

ZUGFESTIGKEIT VON KONSTRUKTIONSLICHTBETON UND NORMALBETON BEI SEHR TIEFEN TEMPERATUREN

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy
Dipl.-Ing. P. Warnecke
Dipl.-Ing. U. Pusch

Dezember 1988

Diese Arbeit wurde mit Hilfe von Forschungsmitteln des Landes
Niedersachsen in dankenswerter Weise gefördert

Erlaß vom 11.06.1986 - GZ: 2095 - BV 4e - 11/86

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Versuchsprogramm	3
3 Versuchskörper	6
3.1 Verwendete Baustoffe	6
3.2 Geometrie und Lasteinleitung der Versuchskörper	8
3.2.1 Versuchskörper der Zentrischen Zugversuche	8
3.2.2 Versuchskörper der Spaltzug- und Druckversuche	16
3.3 Herstellung der Versuchskörper	16
3.4 Lagerung der Versuchskörper	18
4 Versuchseinrichtung	20
4.1 Versuchseinrichtung für die Zentrischen Zugversuche	20
4.2 Versuchseinrichtung für die Spaltzug- und Druckversuche	23
5 Versuchsdurchführung	24
5.1 Versuchsdurchführung der Zentrischen Zugversuche	24
5.2 Versuchsdurchführung der Spaltzug- und Druckversuche	25
6 Versuchsergebnisse	25
6.1 Ergebnisse der Temperaturfeldmessungen	25
6.2 Ergebnisse der Druckversuche	28
6.2.1 Druckfestigkeit	28
6.2.2 Druckbruchdehnung	31
6.2.3 Druck-E-Modul	34
6.3 Ergebnisse der Spaltzugversuche	37
6.3.1 Spaltzugfestigkeit	37
6.4 Ergebnisse der Zentrischen Zugversuche	40
6.4.1 Zugfestigkeit	40
6.4.2 Zugbruchdehnung	45
6.4.3 Zug-E-Modul	48
6.5 Vergleichende Darstellung der Versuchsergebnisse	51

7	Versuchsauswertung	59
7.1	Vorbemerkungen	59
7.2	Beschreibung der Festigkeit und der Verformung von druckbeanspruchtem Beton	62
7.2.1	Druckfestigkeit	62
7.2.2	Druckbruchdehnung	66
7.2.3	Druck-E-Modul	70
7.3	Beschreibung der Festigkeit von zugbeanspruchtem Beton durch Faktoren nach dem CEB FIP Model Code	73
7.3.1	Spaltzugfestigkeit	73
7.3.2	Zentrische Zugfestigkeit	79
7.4	Beschreibung der Festigkeit und der Verformung von zugbeanspruchtem Beton durch einen additiven Rechenansatz	85
7.4.1	Spaltzugfestigkeit	85
7.4.2	Zentrische Zugfestigkeit	92
7.4.3	Zugbruchdehnung	97
7.4.4	Zug-E-Modul	101
8	Zusammenfassung	104
9	Literatur	105
10	Anlagen	109
10.1	Rechenwerte zur Festigkeit und zur Verformung von Normalbeton im Bereich tiefer Temperaturen	109
10.2	Rechenwerte zur Festigkeit und zur Verformung von Leichtbeton im Bereich tiefer Temperaturen	110

1 EINLEITUNG

Im Zuge einer energiewirtschaftlichen Neuorientierung, hervorgerufen durch das Wissen um einen begrenzten Erdölvorrat und der damit verbundenen Suche nach alternativen Primärenergieträgern, gewinnt das verflüssigte Erdgas (LNG genannt) zunehmende Bedeutung. Die Verflüssigung von Erdgas geschieht aus Gründen der Wirtschaftlichkeit von Transport und Lagerung. Die Lagerungstemperatur von LNG beträgt unter Atmosphärendruck rund -165°C , was beim Entwurf und der konstruktiven Durchbildung von Lagerbehältern berücksichtigt werden muß.

Für den Bau von Flüssiggasbehältern wird sich die Spannbetonbauweise durchsetzen, da sie in Stör- und Katastrophenfällen über eine hohe RiBzähigkeit und über ein überlegenes Sicherheitspotential verfügt. Das zuverlässige Beherrschen der mit der Lagerung von LNG verbundenen Risiken erfordert vertiefte Kenntnisse über das Verhalten der Konstruktionswerkstoffe bei tiefen Temperaturen, da erst dann das Bauteilverhalten prognostiziert werden kann. Dabei interessiert aus Sicherheitsgründen vorrangig die Frage, ob die Werkstoffe bei Tieftemperatur neben der zu erwartenden Verfestigung auch eine Versprödung erfahren.

In den vergangenen Jahren sind im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz zahlreiche Forschungsvorhaben zur Festigkeit und zur Verformung von Normal- und Leichtbeton durchgeführt worden /1 bis 16/. Gegenstand der Untersuchungen waren Druck-, Spaltzug- und Biegezugversuche sowie das thermische Dehnverhalten. Auf die Durchführung zentrischer Zugversuche wurde bisher wegen der damit verbundenen Schwierigkeiten verzichtet. Es ist Aufgabe des vorliegenden Forschungsberichts, die hier noch vorhandene Lücke zu schließen.

Es ist das Ziel von Werkstoffuntersuchungen im Tieftemperaturbereich, dem Konstrukteur zur Bearbeitung von Vorprojekten und Fallstudien rechnerische Ansätze zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens in die Hand zu geben. Diese Rechenmodelle sind als Hilfsmittel anzusehen, mehr als grobe Ansätze sind nicht zu erwarten. Im vorliegenden Forschungsbericht wird, basierend auf dem Ansatz für die Druckfestigkeit, ein additiver Rechenansatz gewählt, mit dem das gesamte Festigkeits- und Verformungsverhalten einheitlich in einfacher Form beschrieben werden kann.

Der vorliegende Forschungsbericht faßt alle in den bisherigen Arbeiten entwickelten Rechenansätze zusammen und erweitert ihre Anwendung auf die zentrischen Zugversuche. Er gibt schließlich in handlicher Form Rechenwerte für das gesamte Festigkeits- und Verformungsverhalten von Normal- und Leichtbeton an und versteht sich daher auch als Résumé der bisher auf diesem Gebiet durchgeführten Forschungsarbeiten der Autoren.

2 VERSUCHSPROGRAMM

Zur Beschreibung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Normal- und Leichtbeton wurden Versuche zur Bestimmung der Druck-, der Spaltzug- und der zentrischen Zugfestigkeit im Temperaturbereich zwischen $+20^{\circ}\text{C}$ und -170°C durchgeführt. Als Versuchsparameter wurde neben der Temperaturstufe die Zuschlagart (Normal- und Leichtbeton) und der Feuchtegehalt (Lagerung in Folie und in Normalklima 20°C , 65 % rel. Feuchte) eingeführt. Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten die zentrischen Zugversuche, da hierüber bisher keine Ergebnisse vorliegen. Bei den zentrischen Zugversuchen wurde generell neben der Festigkeit auch die Bruchdehnung und der E-Modul bestimmt. Bei den Druckversuchen wurden diese Werte nur für Raumtemperatur und für -170°C bestimmt.

Im Versuchsprogramm war zunächst die Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit von Normal- und Leichtbeton bei Normalklima- und Folienlagerung vorgesehen. Vorversuche zeigten jedoch, daß die Versuchskörper ab ca. -40°C starke Ribbildung zeigten. Mittels Tränkung eines Versuchskörpers in einer fluoriszierenden Flüssigkeit nach Abkühlung auf -60°C konnte nach dem Zugversuch die Eindringtiefe ermittelt werden. Im Gegensatz zu einem nicht abgekühlten Versuchskörper wies der abgekühlte Versuchskörper im Mittel Eindringtiefen von 1,5 bis 2 cm auf. Dies zeigt, daß die nach der Abkühlung beobachteten Risse an der Versuchskörperoberfläche zu einer signifikanten Verringerung der Querschnittsfläche führen. Es muß daher festgestellt werden, daß die Angabe der Zugfestigkeit aus zentrischen Zugversuchen bei Tieftemperatur für im Normalklima 20/65 gelagerten Normal- und Leichtbeton im hier untersuchten Probenalter nicht möglich ist. Feuchtegradienten über den Versuchskörperquerschnitt müssen in jedem Fall vermieden werden, da die starke Abhängigkeit des Temperaturdehnverhaltens von dem Feuchtegehalt (siehe Bild 3.2) sonst bei der Abkühlung zu einer Vorschädigung führt. Die für die Homogenisierung des Feuchtegehaltes in dem Versuchskörper notwendige Zeitspanne steht im Rahmen von Forschungsvorhaben aber zumeist nicht zur Verfügung.

Aus ähnlichen Gründen wurde die Prüfung der Biegezugfestigkeit nicht in das Versuchsprogramm mitaufgenommen. Versuche hierzu mit Betonen der hier untersuchten Festigkeitsklasse im Rahmen anderer Forschungsvorhaben hatten gezeigt, daß die Biegebalken auch bei Folienlagerung im Kantenbereich Risse infolge Eigenspannungen aufwiesen.

Auf die Durchführung von Biegezugversuchen wurde daher generell verzichtet. Die zentrischen Zugversuche wurden nur an foliengelagerten Versuchskörpern durchgeführt. Die Druck- und Spaltzugversuche wurden hingegen für folien- und normalklimagelagerte Versuchskörper durchgeführt. Die Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm. Wegen des umfangreichen Versuchsprogramms und zur besseren Unterscheidung der in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Versuchsergebnisse von denen früherer Forschungsarbeiten im Abschnitt 7 werden die folgenden Bezeichnungen für die Versuchskörper eingeführt:

- der erste Buchstabe benennt die Betonart mit "L" für Leichtbeton und "N" für Normalbeton;
- der zweite Buchstabe benennt die Versuchsart mit "Z" für zentrisch Zug, "S" für Spaltzug und "D" für Druck;
- der dritte Buchstabe benennt die Lagerungsart mit "S" für Folienlagerung und "N" für Normalklimalagerung.

Zusätzlich wurde nach 7, 28 und 150 Tagen die Druckfestigkeit für den Normalbeton und den Leichtbeton an Würfeln (15/15/15) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 angegeben.

Ferner wurde jeweils ein Versuchskörper aus Normalbeton und Leichtbeton mit Temperaturfühlern versehen. Sie dienen zur Messung des Temperaturfeldes während der Abkühlung. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 6.1 vorgestellt.

Beton	L					N				
Versuchsart	L/Z	L/S		L/D		N/Z	N/S		N/D	
Lagerung	L/Z/S	L/S/S	L/S/N	L/D/S	L/D/N	N/Z/S	N/S/S	N/S/N	N/D/S	N/D/N
+20 °C	β, ϵ, E	β	β	β, ϵ, E	β, ϵ, E	β, ϵ, E	β	β	β, ϵ, E	β, ϵ, E
-40 °C	β, ϵ, E	β	-	β	-	β, ϵ, E	β	β	β	-
-60 °C	β, ϵ, E	β	β	β	β	β, ϵ, E	β	β	β	β
-80 °C	β, ϵ, E	β	-	β	-	β, ϵ, E	β	β	β	-
-100 °C	β, ϵ, E	β	-	β	-	β, ϵ, E	β	β	β	-
-135 °C	β, ϵ, E	β	-	β	-	β, ϵ, E	β	β	β	-
-170 °C	β, ϵ, E	β	β	β, ϵ, E	β, ϵ, E	β, ϵ, E	β	β	β, ϵ, E	β, ϵ, E

Tabelle 2.1 Versuchsprogramm

3 VERSUCHSKÖRPER

3.1 Verwendete Baustoffe

Für die Untersuchungen an Normalbeton wurde ein PZ-Beton B45 gewählt, für die Untersuchungen an Leichtbeton wurde ein PZ-Leichtbeton LB45 gewählt. Beide Mischungen haben 16 cm Größtkorn. Über die beiden gewählten Betone liegen bereits einige Untersuchungen im Tieftemperaturbereich vor, so daß die hier zu erwartenden Ergebnisse bewertet und ergänzt werden können /1,6,7,8/. Tabelle 3.1 enthält die Zusammensetzung der untersuchten Betone und die Prüfergebnisse der Begleitversuche bei RT.

		Normalbeton	Leichtbeton
Festigkeitsklasse	-	B 45	LB 45
Zement	-	PZ 35 F	PZ 45 F
Konsistenzbereich	-	K 2	K 2-3
Verdichtungsmaß nach Mischen	-	1,18	1,05
Verdichtungsmaß nach Einbringen (30 min)	-	-	1,12
wirks. w/z-Wert	-	0,67	0,52
Gesamtwassergehalt W_{ges}	kg/m ³	229	298
Wassergehalt der vorgefeuchteten Leichtzuschläge	kg/m ³	-	105
wirks. Wassergehalt W_{wirks}	kg/m ³	-	182
Zementgehalt Z	kg/m ³	340	350
EFA-Füller	kg/m ³	-	80
Fließmittel	kg/m ³	-	2,8
Zuschläge Korngruppe 0-2	kg/m ³	557	N 341
Korngruppe 0-4	kg/m ³	-	L 202
Korngruppe 2-8	kg/m ³	890	-
Korngruppe 4-8	kg/m ³	-	L 241
Korngruppe 8-16	kg/m ³	408	L 259
N=Natursand L=Liapor vorgefeuchtet	$\Sigma =$	1855	1043
Frischbetonrohddichte (gemessen)	kg/dm ³	2,38	(trocken) 1,84 (1,61)
Betonrohddichte nach 28 Tagen	kg/dm ³	2,34	1,84 (1,60)
nach 150 Tagen	kg/dm ³	2,38	1,84 (1,60)
Würfeldruckfestigkeit nach 7 Tagen	N/mm ²	38,0	41,0
nach 28 Tagen	N/mm ²	53,0	55,0
nach 150 Tagen	N/mm ²	52,0	62,0

Tabelle 3.1 Zusammensetzung der untersuchten Betone und
Prüfergebnisse der begleitversuche bei Raumtemperatur

3.2 Geometrie und Lasteinleitung der Versuchskörper

3.2.1 Versuchskörper der Zentrischen Zugversuche

Die Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit von Beton bei Raumtemperatur bereitet heute dank der modernen Klebstoffe keine versuchstechnischen Schwierigkeiten. Über Versuchsmethoden zur Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit bei TT, die auch für Leichtbeton geeignet sind, liegen hingegen bisher keine Erkenntnisse vor, so daß ein wesentlicher Schwerpunkt des vorliegenden Forschungsvorhabens darin bestand, für den Tieftemperaturbereich geeignete Versuchsmethoden zu entwickeln. Im folgenden wird daher nicht nur die gewählte Versuchskörperform dargestellt, sondern es wird der Entwicklungsweg und der Umfang der durchgeführten Vorversuche umrissen.

Zur Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit von Beton sind hinsichtlich der Lasteinleitung drei prinzipielle Möglichkeiten denkbar:

- Lasteinleitung durch eine Klebung zwischen Beton und Stahlplatte (Bild 3.1a)
- Lasteinleitung durch einbetonierte Verbundstäbe (Bild 3.1b)
- Lasteinleitung durch eine Klemmwirkung (Bild 3.1c)

An die Versuchskörperform zur Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit von Beton bei TT sind folgende Anforderungen zu stellen:

- Die geringste Querschnittsabmessung soll dem fünffachen Größtkorndurchmesser entsprechen. Dies bedeutet für die hier untersuchten Betone 8 cm /13/.
- Die freie Länge des Versuchskörpers soll mindestens dem zehnfachen Größtkorndurchmesser entsprechen (hier 16 cm)/13/.
- Außerhalb der Krafteinleitungslänge ist eine ebene Spannungsverteilung über dem Querschnitt anzustreben.

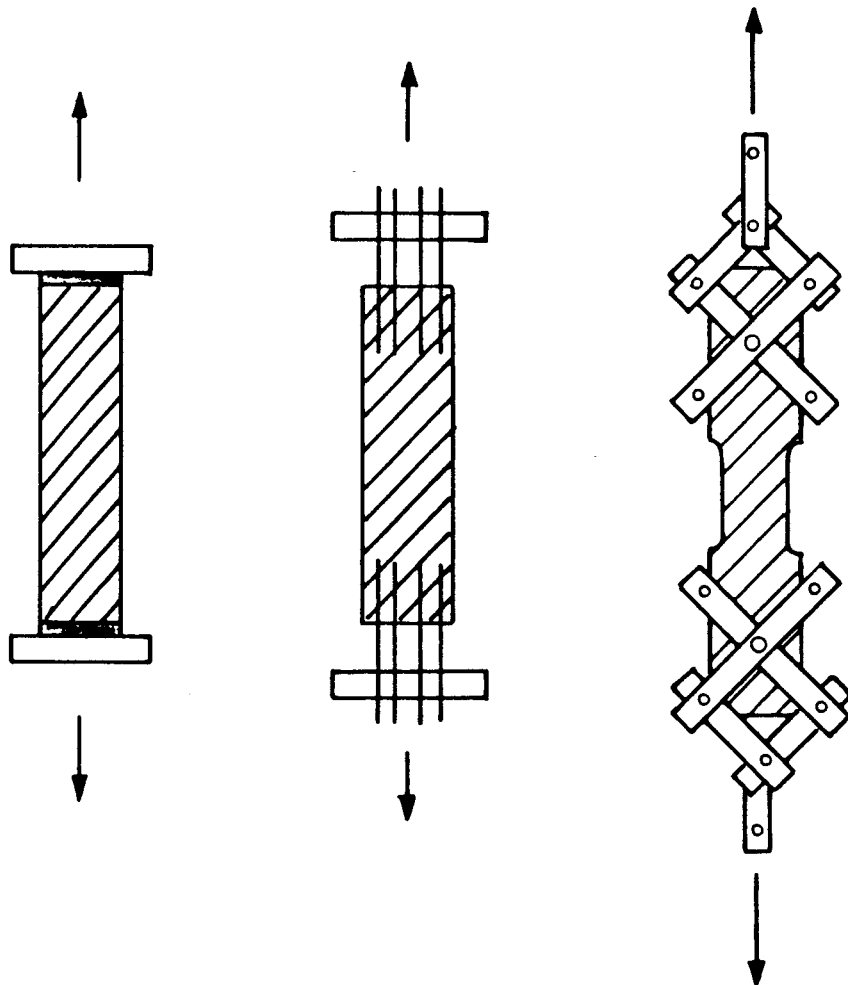


Bild 3.1

Möglichkeiten der Lasteinleitung für zentrische
Zugversuche an Beton

- Die Krafteinleitung soll möglichst ohne Kraftumlenkung erfolgen, d.h. zweiachsige Spannungszustände sind zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, so muß der Übergang vom Krafteinleitungsbereich in die freie Länge angebar sein.
- In Vorversuchen hat sich eine zylindrische Körperform als vorteilhaft erwiesen. Bei eckigen Körpern tritt im Kantenbereich beim Abkühlen infolge Temperatureigenspannungen eine verstärkte Ribbildung auf.
- Im Hinblick auf das Ansteifverhalten des Leichtbetons darf die Herstellung aller Versuchskörper einer Betonage höchstens 30 Minuten dauern.
- Der Versuchskörper muß einen möglichst schnellen Einbau in die Prüfmaschine ermöglichen.

Lasteinleitung durch Klemmwirkung

Das Ziel von zentrischen Zugversuchen ist es, Brüche auf der freien Länge des Versuchskörpers zu erzeugen. Versuchskörper, bei denen die Krafteinleitung über Klemmwirkung erfolgt, werden daher oft in Form von "Hundeknochen" hergestellt (Bild 3.1c). Diese Versuchskörper haben zumeist rechteckige Querschnitte. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sind jedoch Versuchskörper mit runden Querschnitten vorgesehen. Daraus ergeben sich Probleme bei der Krafteinleitung: sind die Greifbacken tangential zum Querschnitt der Versuchskörper angeordnet, ergeben sich punktuell große Lasteinleitungskräfte und daraus resultierend Spaltzugkräfte im Versuchskörper; wird die Klemmwirkung durch kegelstumpfförmige Greifbacken erzeugt, ergeben sich Biegespannungen infolge Passungsabweichungen und daher hohe Anforderungen an die Formtreue der Schalung. Daher sind Versuchskörper mit rundem Querschnitt und Lasteinleitung über Klemmwirkung für die hier vorgesehenen Versuche nicht geeignet.

Lasteinleitung durch Klebung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde deshalb zunächst die Lasteinleitung über Klebung untersucht. Dieses Verfahren ermöglicht einfache Versuchskörper, schnelle Montage in der Prüfmaschine und eine annähernd ebene Spannungsverteilung auch im Krafteinleitungsbereich. Allerdings bewirkt die

Klebung auch in radialer Richtung des Versuchskörpers einen starren Verbund zwischen Beton und Stahl. Damit wird die thermische Dehnung der verwendeten Materialien zum maßgebenden Kriterium.

Die thermische Dehnung der untersuchten Betone wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht ermittelt, es konnte jedoch auf Ergebnisse vorausgegangener Forschungsberichte zurückgegriffen werden /1,7/. Bild 3.2 zeigt die thermische Dehnung von Normal- und Leichtbetonen, die in Zusammensetzung und Feuchtegehalt den hier untersuchten ähnlich sind und jene von Stahl.

In ersten Vorversuchen wurden zylindrische Versuchskörper (8 cm Durchmesser, 16 cm Höhe) mit verschiedenen handelsüblichen Klebern direkt auf die Stahlplatte geklebt und auf -170°C abgekühlt. Nach der Abkühlung zeigten die Versuchskörper aus foliengelagertem Leichtbeton in einem Abstand von 1 cm von der Klebung umlaufende Risse. Die bei -170°C erreichten Bruchspannungen lagen bei $3,0 \text{ N/mm}^2$, der Bruch trat auf Höhe der vorher festgestellten Risse ein. Bei einigen Klebern wurde auch ein Versagen der Klebfuge festgestellt. Die Versuchskörper aus foliengelagertem Normalbeton zeigten keine Risse nach der Abkühlung und erreichten Bruchspannungen von $5,0$ bis $6,0 \text{ N/mm}^2$. Die Brüche lagen 2 - 3 cm von der Klebung entfernt. Offenbar führt der starre Verbund in radialer Richtung zwischen Stahlplatte und Versuchskörper bei unterschiedlichem thermischen Dehnverhalten zu einer Zwängung des Versuchskörpers. Die Klebung direkt auf die Stahlplatte ist daher für Leichtbetone mit höheren Feuchtegehalten ungeeignet.

In der zweiten Vorversuchsreihe wurde versucht, mittels einer Zwischenschicht aus Beton zwischen Stahl und foliengelagertem Leichtbeton die Dehnungsdifferenz pro Klebeschicht zu vermindern. Als Material für die Zwischenschicht erschien normalklimagelagerter Leichtbeton und foliengelagerte Normalbeton (siehe Bild 3.2) geeignet. Die Versuchskörper mit einer Zwischenschicht aus normalgelagertem Leichtbeton blieben nach dem Abkühlen auf -170°C zwar rissefrei, versagten aber bei Bruchspannungen von $3,5 \text{ N/mm}^2$ in der Zwischenschicht. Dies weist darauf hin, daß auch die zentrische Zugfestigkeit von Leichtbeton mit steigendem Feuchtegehalt ansteigt. Die Versuchskörper aus foliengelagertem Leichtbeton mit einer Zwischenschicht aus foliengelagertem Normalbeton zeigten nach Abkühlung auf -170°C umlaufende Risse im foliengelagerten Leichtbeton.

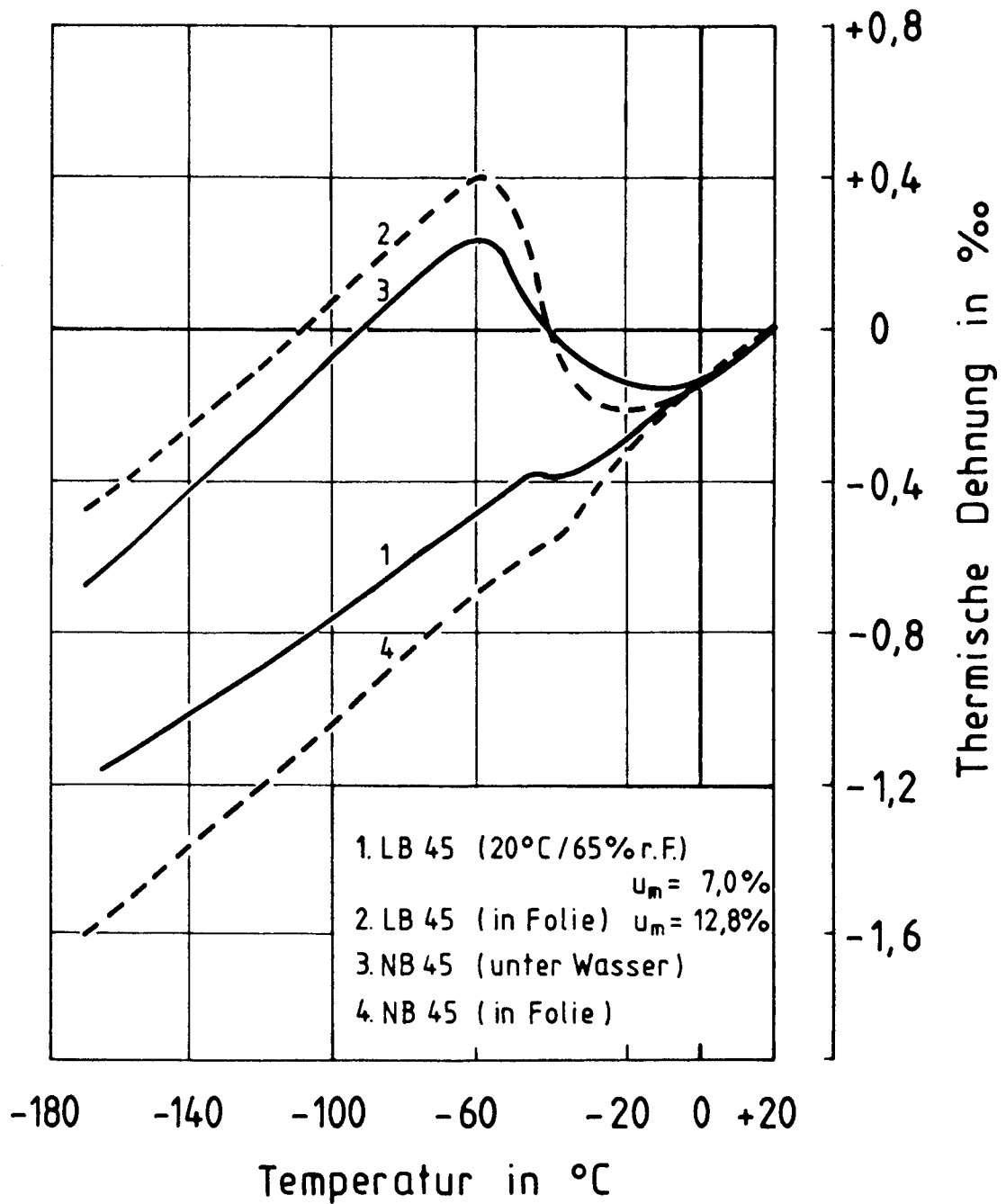


Bild 3.2

Thermische Dehnung von Normalbeton und Leichtbeton
 bei verschiedenen Feuchtegehalten nach /6/

In der dritten Vorversuchsreihe wurden Versuchskörper aus foliengelagertem Leichtbeton auf eine "Stahlbürste" geklebt. Diese Art der Lasteinleitung wird für Untersuchungen zur ein- und zweiachsigen Druckfestigkeit von Beton im Hochtemperaturbereich eingesetzt. Sie ermöglicht eine ungehinderte Querdehnung. Für Zugversuche erwies sich diese Lasteinleitung als ungeeignet. Sie ist in radialer Richtung zu instabil, die zur Verfügung stehende Klebfläche ist zu gering. Eine gleichmäßige Beanspruchung der einzelnen Stäbe kann infolge des Lochspiels der Bolzen nicht gewährleistet werden.

Abschließend muß festgestellt werden, daß die Lasteinleitung durch Klebung für Leichtbetone höheren Feuchtegehaltes im Tieftemperaturbereich ungeeignet ist.

Lasteinleitung durch einbetonierte Verbundstäbe

Die vorausgegangenen Versuche hatten gezeigt, daß infolge des thermischen Dehnverhaltens von foliengelagertem Leichtbeton bei starrem Verbund in radialer Richtung Zwängungen auftreten, die den Versuchskörper bereits beim Abkühlen schädigen. Notwendig ist also eine in radialer Richtung weiche Verankerung. Daher erscheint die Lasteinleitung mittels Verbundstäben sinnvoll.

Aus der Forderung nach einem runden Querschnitt des Versuchskörpers folgte, daß die Versuchskörper stehend betoniert werden mußten. Wegen der großen Anzahl der Versuchskörper, die zudem aus einer Mischung hergestellt werden sollten, wurde als Schalung ein PP - Kunststoffrohr vorgesehen. Als Verbundstäbe wurden Gewindestangen mit Muttern vorgesehen. Bild 3.3 zeigt die Verankerungen, die sich aus einer Reihe von Vorversuchen ergeben hatten.

Als problematisch erwies sich der Verbund zwischen Beton und der oberen Verankerung. Da die Versuchskörper stehend betoniert werden sollten, wurde zunächst versucht, die obere Verankerung einzurütteln. Diese Lösung erwies sich jedoch als unbrauchbar: die Versuchskörper zeigten Verdichtungsmängel, die Brüche traten direkt unter der Verankerung ein. Es wurden daher Öffnungen im oberen Teil der Schalung vorgesehen, so daß der Beton um die eingesetzte obere Verankerung herum eingebracht werden konnte. Bild 3.4 zeigt den Versuchskörper mit der Schalung und den eingesetzten Verankerungen. Zur Herstellung der Versuchskörper gibt der Abschnitt 3.3 weitere Angaben.

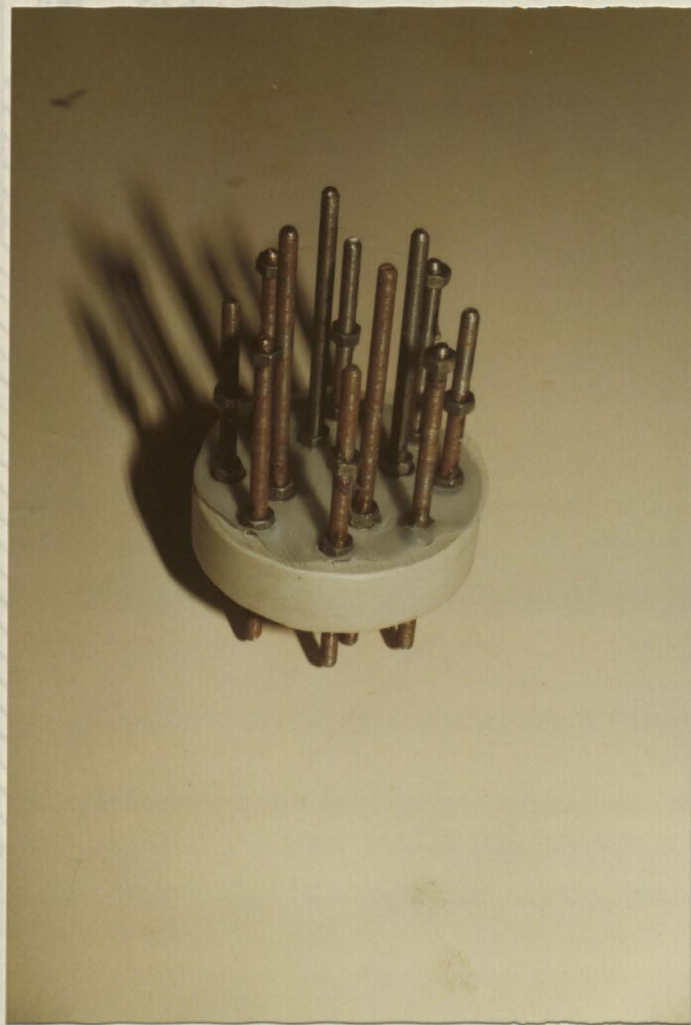
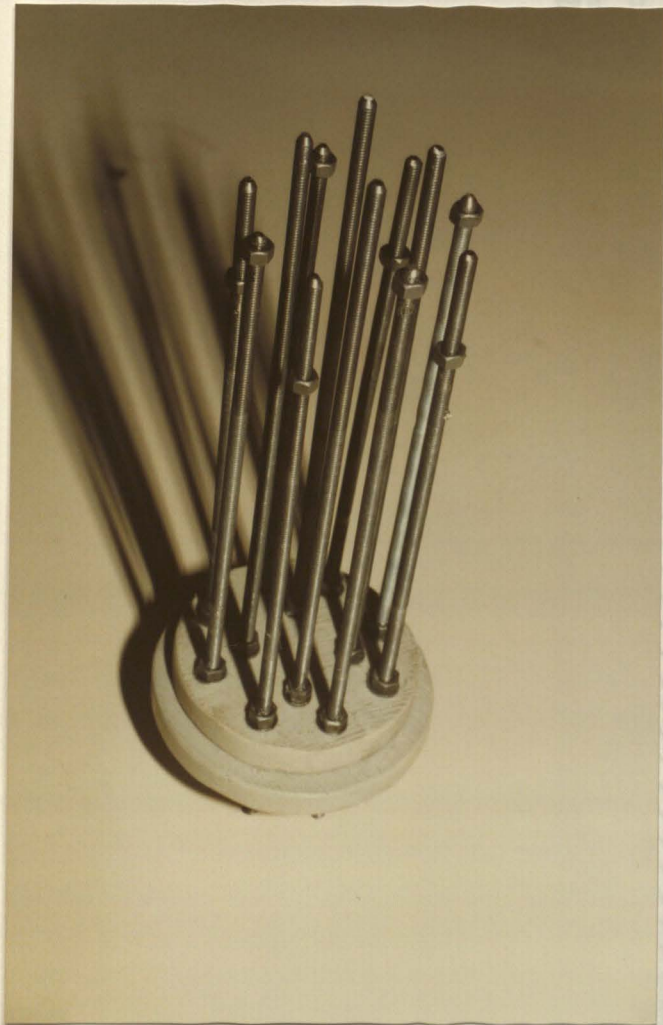
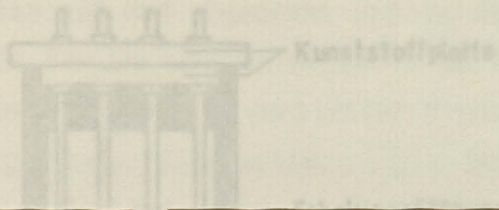


Bild 3.3

a) Obere Verankerung

b) Untere Verankerung



Bild 3.4

Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche mit Schalung und Verankerungen

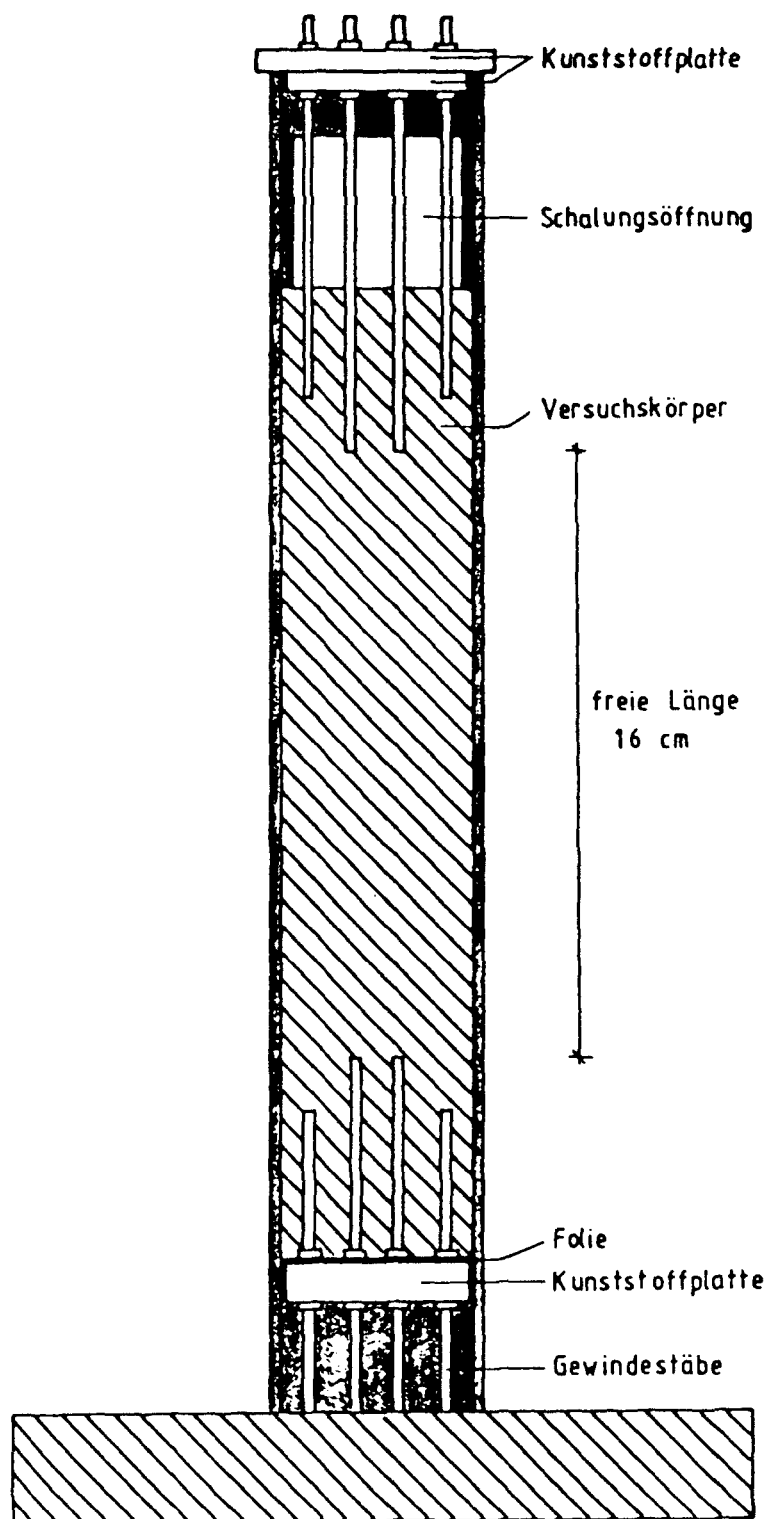


Bild 3.4 Versuchskörper für die zentrischen Zugversuche mit Schalung und Verankerungen

3.2.2 Versuchskörper der Spaltzug- und Druckversuche

Die Arretierung der unteren Verankerung erfolgte mit einer Scheibe aus PP - Kunststoff, die aus einem Vollstab auf Maß abgedreht und in das Rohr eingesetzt wurde. Die Arretierung der oberen Verankerung erfolgte in horizontaler Richtung mit einer in das Rohr eingesetzten Scheibe, in vertikaler Richtung mit einer auf das Rohr aufgesetzten Scheibe größeren Durchmessers. Die Gewindestäbe wurden durch geschraubte und verklebte Muttern ober- und unterhalb der Scheiben arretiert.

Die Abmessungen der Versuchskörper entsprechen damit den in /4, 13/ gegebenen

Bei Vorversuchen mit der hier beschriebenen Verankerung wurden bei -170°C für foliengelagerten Leichtbeton ausschließlich Brüche auf der freien Länge festgestellt.

Die Herstellung der beschriebenen Verankerungen ist sehr zeitaufwendig (Bild 3.5 zeigt einen Teil der hergestellten Verankerungen). Die Betonage und die Verdichtung der Versuchskörper verlangen darüber hinaus weitere spezielle Maßnahmen, die in Abschnitt 3.3 beschrieben werden. Die umfangreichen Vorversuche zeigten jedoch, daß nur Verbundkörper der beschriebenen Art für zentrische Zugversuche von Leichtbeton höheren Feuchtegehalts bei Tieftemperatur geeignet sind.

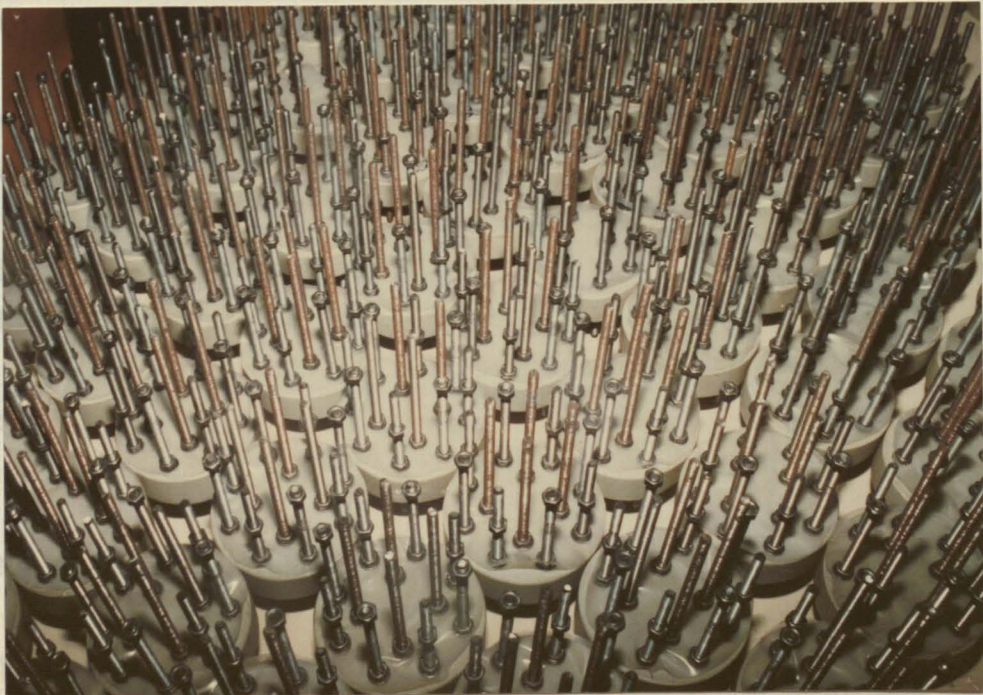


Bild 3.5 Ein Teil der hergestellten Verankerungen

3.2.2 Versuchskörper der Spaltzug- und Druckversuche

- Für die Spaltzugversuche wurden zylindrische Versuchskörper mit 8 cm Durchmesser und 8 cm Höhe vorgesehen.
- Für die Druckversuche wurden zylindrische Versuchskörper mit 8 cm Durchmesser und 16 cm Höhe vorgesehen.

Die Abmessungen der Versuchskörper entsprechen damit den in /4, 13/ gegebenen Empfehlungen und den in den bisherigen Forschungsvorhaben der Autoren untersuchten Versuchskörpern.

3.3 Herstellung der Versuchskörper

Auf die Probleme beim Betonieren der zentrischen Zugkörper wurde bereits in Abschnitt 3.2.1 hingewiesen. Vorversuche hatten gezeigt, daß das Einfüllen des Betons nach dem Arretieren der oberen Verankerung erfolgen mußte. Daher wurde folgender Betonierablauf vorgesehen.

- Einfüllen des Betons bis 10 cm unter die Unterkante der Schalungsöffnung
- Aufsetzen der oberen Verankerung und Sichern durch Klebeband
- Einfüllen des Betons durch die Öffnung bei gleichzeitiger Verdichtung durch Rütteltisch und Schalungsrüttler

Die durchgeführten Vorversuche hatten gezeigt, daß speziell bei Leichtbeton die durch den Rütteltisch zu erreichende Verdichtungsenergie nicht ausreichte, um die Zugkörper auch im oberen Bereich zu verdichten. Daher wurde der in Bild 3.6 und 3.7 dargestellte Holzrahmen konstruiert. Jeder Rahmen nahm 10 Versuchskörper auf. Durch den Verguß des Holzrahmens mit Gips am Fuß der Versuchskörper sowie unterhalb der Schalungsöffnung wurden die Versuchskörper im Holzkasten gehalten (Bild 3.6). Anschließend wurde der Holzkasten mit zwei GEWI-Stäben der Länge nach verspannt. Zur Erhöhung der Rüttelenergie wurde jeder Holzkasten mit zwei Schalungsrüttlern versehen (Bild 3.7).

Alle Druck-, Spaltzug- und zentrischen Zugversuchskörper entstammen sowohl beim Normal- als auch beim Leichtbeton jeweils einer 500 Liter Mischung. Für die

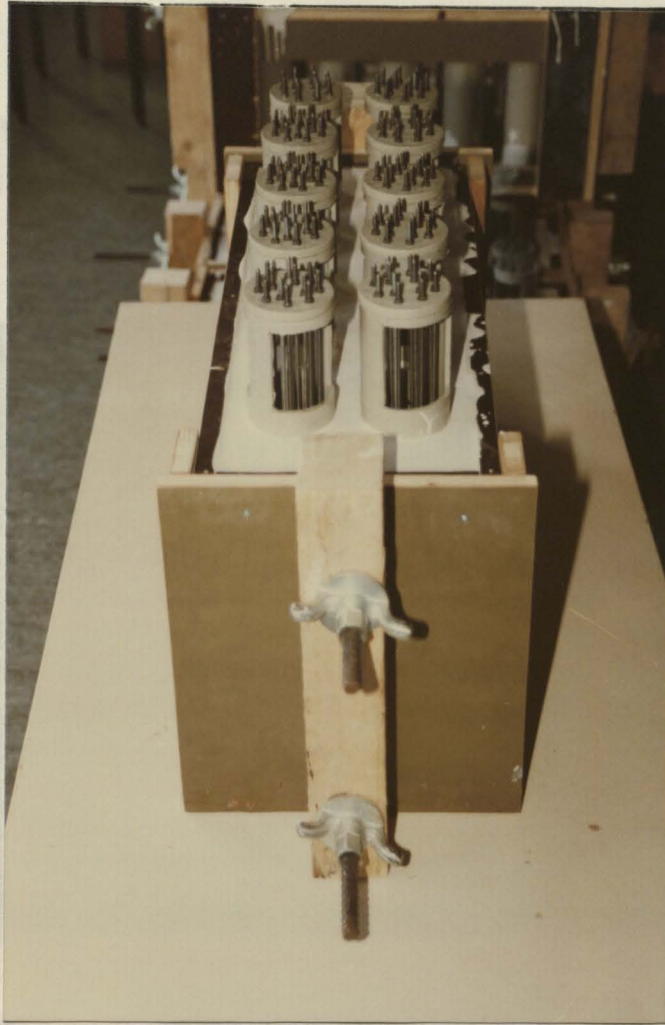


Bild 3.6 Holzrahmen zur Aufnahme der zentrischen Zugkörper mit Gipsschicht und Verspannung

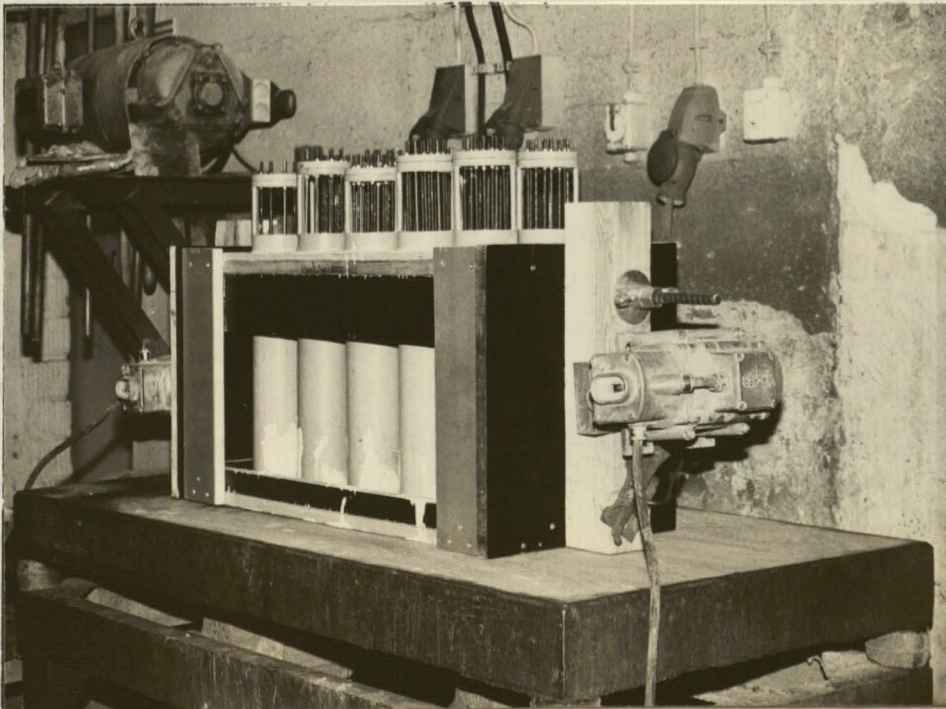


Bild 3.7 Holzrahmen mit angebrachten Schalungsrüttlern auf dem Rütteltisch

Herstellung aller Versuchskörper einer Mischung wurden maximal 30 Minuten benötigt, Tabelle 3.1 gibt das danach ermittelte Verdichtungsmaß für den Leichtbeton an. Bild 3.8 zeigt die verdichteten Versuchskörper aus Leichtbeton. Die Spaltzug- und Druckversuchskörper wurden wie die Versuchskörper für den zentrischen Zug in Rohrschalung aus PP- Kunststoff hergestellt.

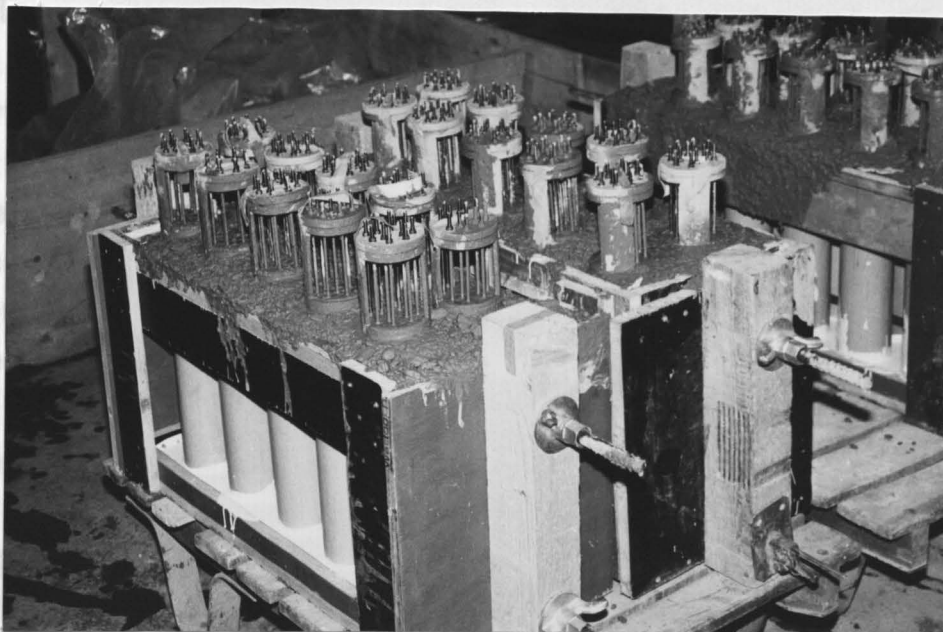


Bild 3.8 Zentrische Zugkörper aus Leichtbeton nach der Verdichtung

3.4 Lagerung der Versuchskörper

Normalbetonkörper

Die in Rohrschalung hergestellten Versuchskörper für Druck, Spaltzug und zentrischen Zug lagerten nach der Betonage zunächst in der Schalung 7 Tage in feuchten Tüchern. Die für die Normalklimalagerung (20°C, 65% rel. Feuchte) vorgesehenen Versuchskörper wurden danach ausgeschalt und im Klimaraum gelagert. Die für Folienlagerung vorgesehenen Versuchskörper verblieben in der Schalung, die Stirnseiten wurden mit Folie versiegelt. Im Alter von 50 Tagen wurden die Spaltzug- und die Druckkörper auf die vorgesehene Körperlänge naß zugeschnitten. Die foliengelagerten Versuchskörper verblieben hierbei in der Schalung. Nach dem Schneiden wurden bei den foliengelagerten Versuchskörpern die Stirnseiten erneut mit Folie versiegelt, sie lagerten bis zum Versuchsbeginn in der Schalung. Die normalklimagelagerten Versuchskörper lagerten bis zum Versuchsbeginn im Klimaraum.

Leichtbetonkörper

Die foliengelagerten Versuchskörper für Druck, Spaltzug und zentrischen Zug wurden wie die Normalbetonkörper behandelt.

Ausschalen

Alle Versuchskörper wurden im Alter von ca. 150 Tagen geprüft. Die in Rohrschalung hergestellten Versuchskörper für Druck, Spaltzug und zentrischen Zug wurden auf folgende Weise ausgeschalt. Die Versuchskörper wurden auf einer Präzisionssäge arretiert. Dann wurde das PP - Rohr der Länge nach angeschnitten. Hierbei wurde die Schnitttiefe so eingestellt, daß von der Schalung eine Restdicke von ca. 1 mm verblieb. Zum Zeitpunkt des Ausschalens konnte die Schalung durch einen Messerschnitt und Aufhebeln entfernt werden. Eine Beschädigung der Versuchskörper durch das Schneiden wurde nicht festgestellt.

Feuchtegehalte

Die bei Versuchsbeginn (nach 150 Tagen) gemessenen mittleren Feuchtegehalte der Versuchskörper sind in Tabelle 3.2 angegeben. Die Werte entsprechen den in /1/ ermittelten Werten.

	Folienlagerung	Klimalagerung (20/65)
Normalbeton	N/Z/S: 5,5 % N/S/S: 6,0 % N/D/S: 5,5 %	N/S/N: 4,5 % N/D/N: 4,5 %
Leichtbeton	L/Z/S: 12,0 % L/S/S: 12,5 % L/D/S: 12,0 %	L/S/N: 8,0 % L/D/N: 8,0 %

Tabelle 3.2 Mittlerer Feuchtegehalt u_m der Versuchskörper nach 150 Tagen (Versuchsbeginn)

4 VERSUCHSEINRICHTUNG

4.1 Versuchseinrichtung für die Zentrischen Zugversuche

Prüfmaschine

Bild 4.1 zeigt die verwendete, elektromechanische Universalprüfmaschine der Firma Zwick mit einer Nennlast von 500 kN für Prüfungsgeschwindigkeiten von 0,01 - 500 mm/min.

Ankopplung der Versuchskörper

Die Ankopplung der Versuchskörper an die Prüfmaschine sollte einerseits im Hinblick auf die dehnungsgesteuerte Versuchsdurchführung druck- und zugstarr sein. Andererseits sind zur Vermeidung von Biegespannungen gelenkige Ankopplungen notwendig. Für die durchgeführten Versuche wurde ein Mittelweg beschritten (siehe Bild 4.2). In die untere Stahlscheibe, in der die Gewindeschrauben durch Kontermuttern gesichert waren, wurde eine Kalotte eingefräst und mit einer Bohrung versehen. Die durchgeführte Gewindestange wurde in das Querhaupt der Prüfmaschine eingeschraubt und ermöglichte einen gelenkigen Anschluß an die Stahlscheibe. Die obere Stahlscheibe wurde in den oberen Verankerungsrahmen eingeschoben. Der Gelenkpunkt liegt hier im oberen Querhaupt der Prüfmaschine.



Bild 4.1 Versuchseinrichtung der zentrischen Zugversuche

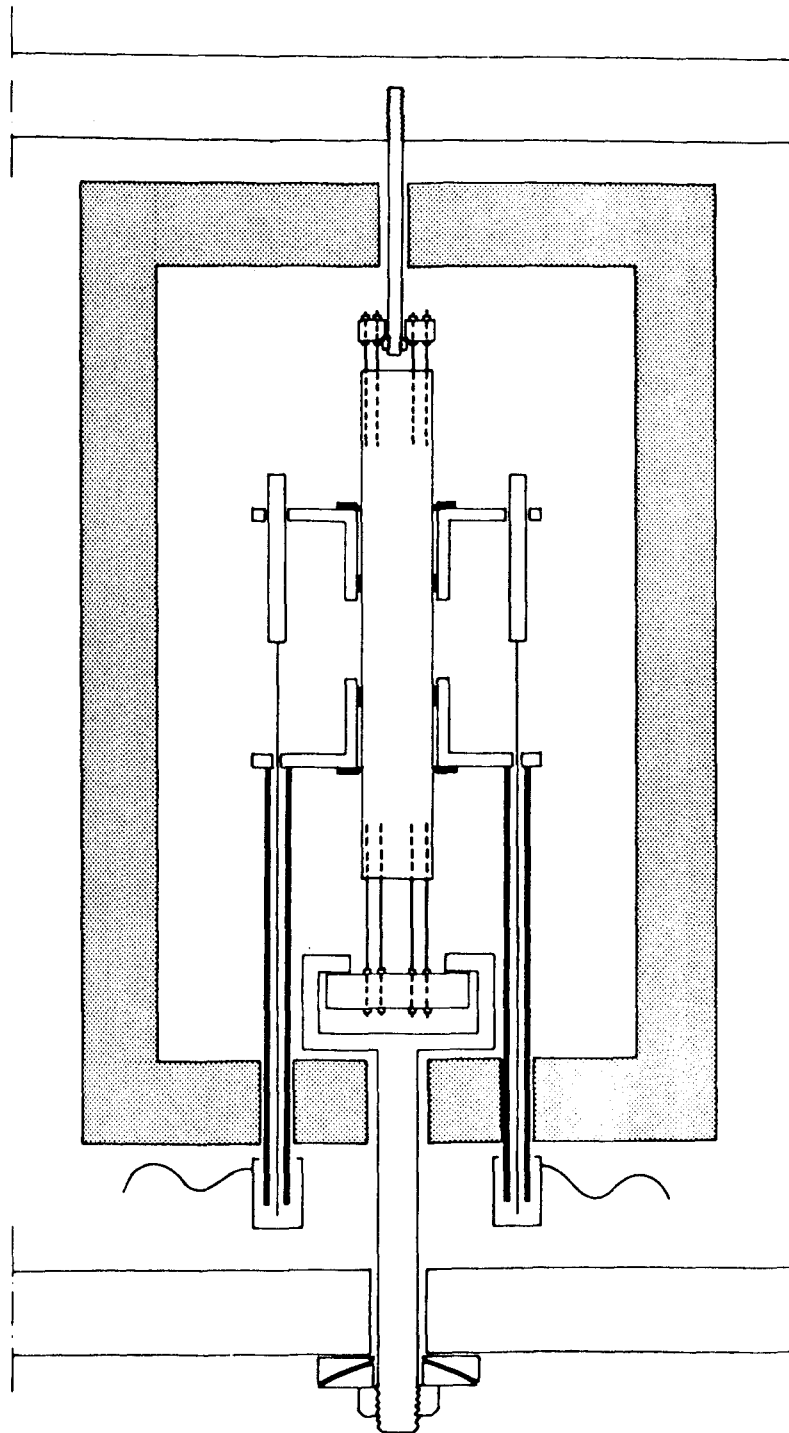


Bild 4.2

Versuchsaufbau der zentrischen Zugversuche

Wegmeßsystem

Im Rahmen der Vorversuchsserien waren zunächst DMS zur Dehnungsmessung benutzt worden. Die thermische Dehnung des Betons wurde durch Differenzbildung mit einem zweiten, in der Kammer stehenden Körper berücksichtigt. Es zeigte sich jedoch, daß die DMS für dehnungsgesteuerte Zugversuche nicht geeignet sind. Einerseits herrschen bei jedem Einblasen von Stickstoff in die Kältekammer deutliche Temperaturunterschiede im Inneren der Kammer, andererseits ist die thermische Eigendehnung der DMS nicht linear. Daher wurde das in Bild 4.2 dargestellte Wegmeßsystem mit außerhalb der Kältekammer liegenden induktiven Wegaufnehmern (Typ W1 von Hottinger - Baldwin, parallel geschaltet) entwickelt. Die Arrettierung des Meßsystems am Versuchskörper erfolgte pro Seite über zwei Schneiden (Bild 4.3).

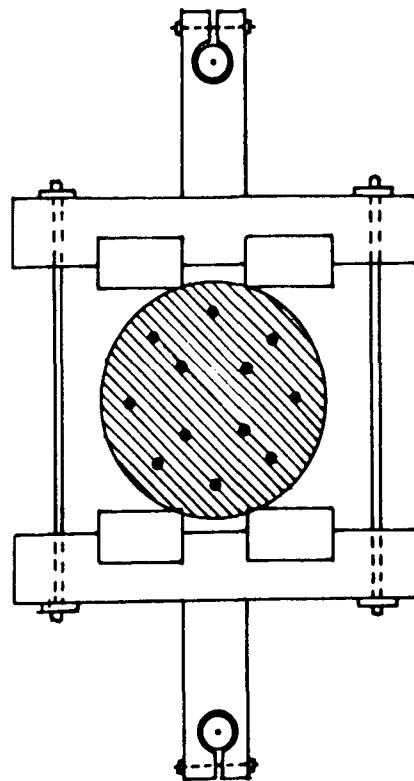


Bild 4.3

Schnitt durch den Versuchskörper und das Wegmeßsystem
nach Bild 4.2

4.2 Versuchseinrichtung für die Spaltzug- und Druckversuche

Die verwendete Versuchseinrichtung entsprach der in /17/ entwickelten. Bild 4.4 zeigt den Versuchsaufbau. Als Kühlmittel wurde mittels Propeller zerstäubter Flüssigstickstoff verwendet. Bei den Versuchen zur Ermittlung von E-Modul und Bruchdehnung erfolgte die Dehnungsmessung durch Beton-DMS. Die Temperaturkompensation erfolgte durch einen weiteren mit Beton-DMS versehenen Versuchskörper, der neben dem zu prüfenden Versuchskörper in der Kältekammer stand. Zwischen die Druckstempel und die Stirnenden der Versuchskörper wurden bei den Druckversuchen 1 mm starke Pappschichten zur Wärmedämmung gelegt. Bei den Spaltversuchen wurden 10 mm breite und 5 mm dicke Filzstreifen zwischen den Druckplatten und der Mantelfläche des Versuchskörpers verwendet.

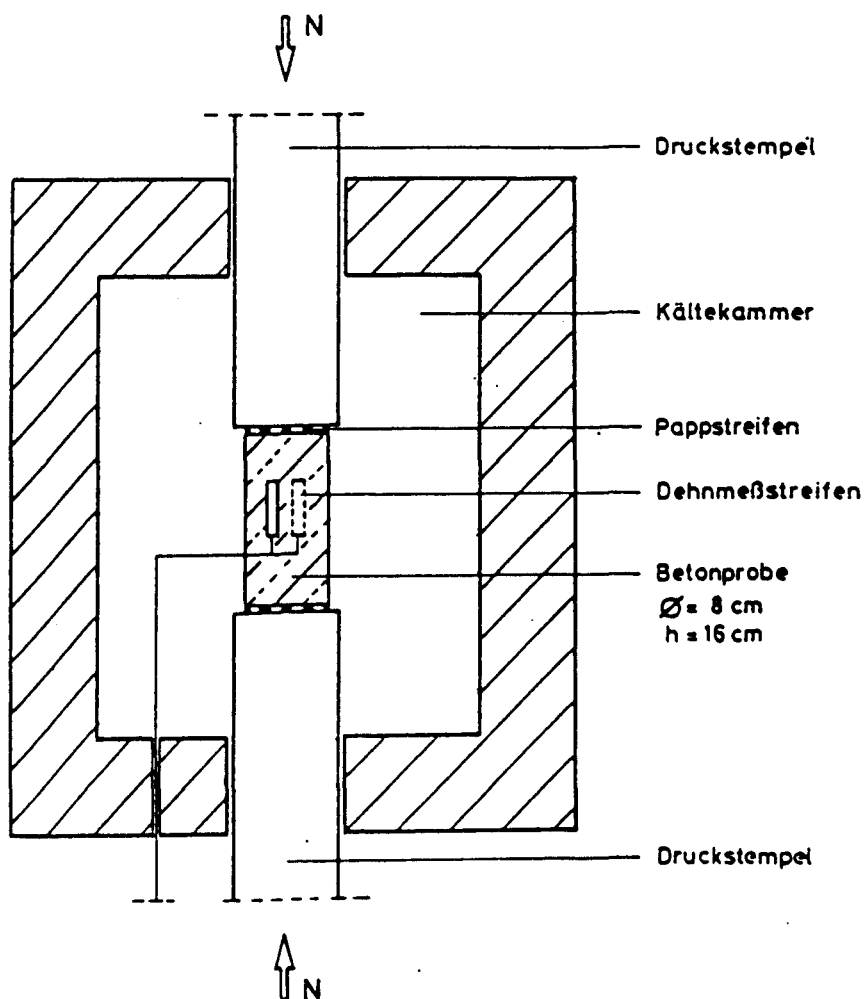


Bild 4.4

Versuchsaufbau der Druckversuche

5. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 Versuchsdurchführung der Zentrischen Zugversuche

Nach dem Ausschalen der Versuchskörper wurden die Kunststoffscheiben der oberen und unteren Verankerung entfernt (siehe Bild 3.3). Anschließend wurden die Gewindestäbe in Stahlscheiben eingefädelt und mit Muttern ober- und unterhalb der Stahlscheiben arretiert. Bild 5.1 zeigt die verwendete Einbauhilfe, die ein Ausrichten der Stahlscheiben auf die Versuchskörperachse ermöglichte.

Es wurden jeweils vier Versuchskörper gleichzeitig in der Kältekammer mit einer Geschwindigkeit von 0,5 K/min abgekühlt. Der zu prüfende Versuchskörper wurde unten in die Prüfmaschine eingeschraubt und oben in den Verankerungsrahmen eingeschoben (siehe Bild 4.1). Danach wurde das Wegmeßsystem befestigt. Nach dem Schließen der Kältekammer wurde die Kammertemperatur 15 Minuten konstant gehalten. Nachdem sich das Wegmeßsystem stabilisiert hatte, wurde der Zugversuch mit einer konstanten Geschwindigkeit von $\dot{\Delta l} = 0,012 \text{ mm/min}$ durchgeführt.

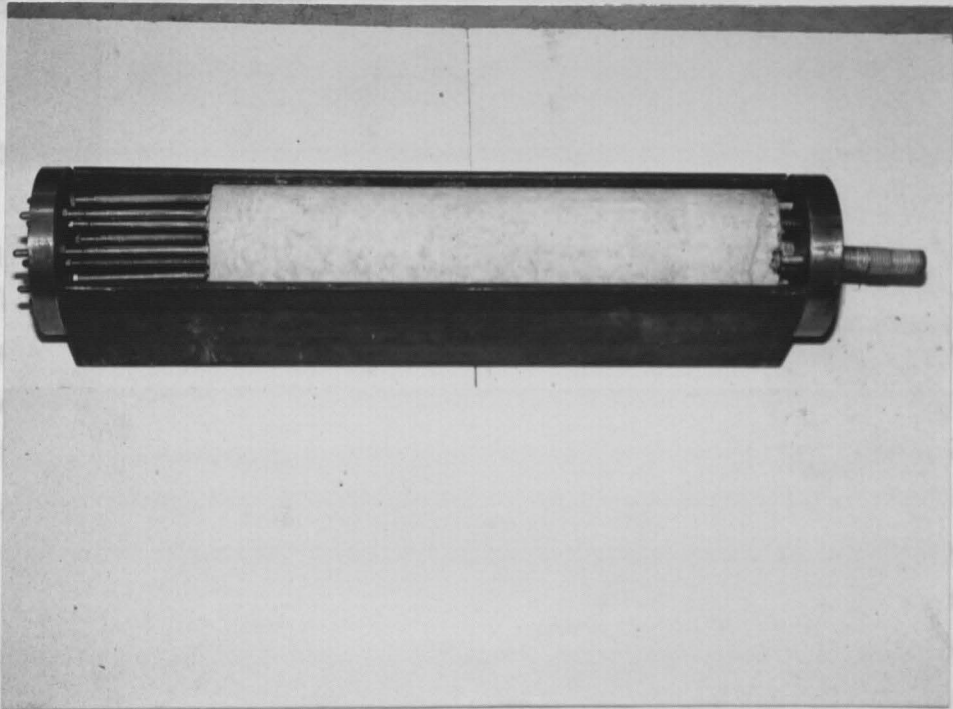


Bild 5.1

Einbauhilfe zum Zentrieren der Ankerplatten der zentrischen Zugkörper

5.2 Versuchsdurchführung der Spaltzug- und Druckversuche

Die Abkühlgeschwindigkeit betrug 0,5 K/min. Nach Erreichen der Prüftemperatur wurde die Temperatur 30 Minuten konstant gehalten, um ein vollständiges Durchkühlen zu gewährleisten. Die Spaltzugversuche sowie die Druckversuche wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 mm/min (Kolbenweg) durchgeführt.

6 VERSUCHSERGEBNISSE

In den Abschnitten 6.2 bis 6.4 werden die Versuchsergebnisse beschrieben. In den Bildern ist die Mittelwertlinie und die jeweilige Streubreite angegeben. Jeder Mittelwert wurde aus mindestens drei Versuchsergebnissen gebildet, Ausnahmen hiervon werden gesondert erwähnt.

6.1 Ergebnisse der Temperaturfeldmessungen

Zur Messung der Temperaturverteilung im Versuchskörper während der Abkühlung wurde jeweils ein zentrischer Zugkörper aus foliengelagertem Leichtbeton und aus foliengelagertem Normalbeton mit einbetonierten Temperaturfühlern versehen. Die Abkühlgeschwindigkeit für die Kammertemperatur betrug wie bei den Zugversuchen 0,5 K/min. Bild 6.1 zeigt die Ergebnisse für den Normalbeton, Bild 6.2 für den Leichtbeton. Die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen Versuchskörperoberfläche und Versuchskörpermitte betrugen beim Normalbeton 6,0 Kelvin, beim Leichtbeton 11,5 Kelvin. Die größten Temperaturdifferenzen traten zwischen 0°C und -60°C auf. Nach [7] kann angenommen werden, daß die gemessenen Temperaturdifferenzen für den Beton unschädlich sind. Für die normalklimagelagerten Versuchskörpern sind nach den Ergebnissen von [7] ähnliche Temperaturdifferenzen zu erwarten.

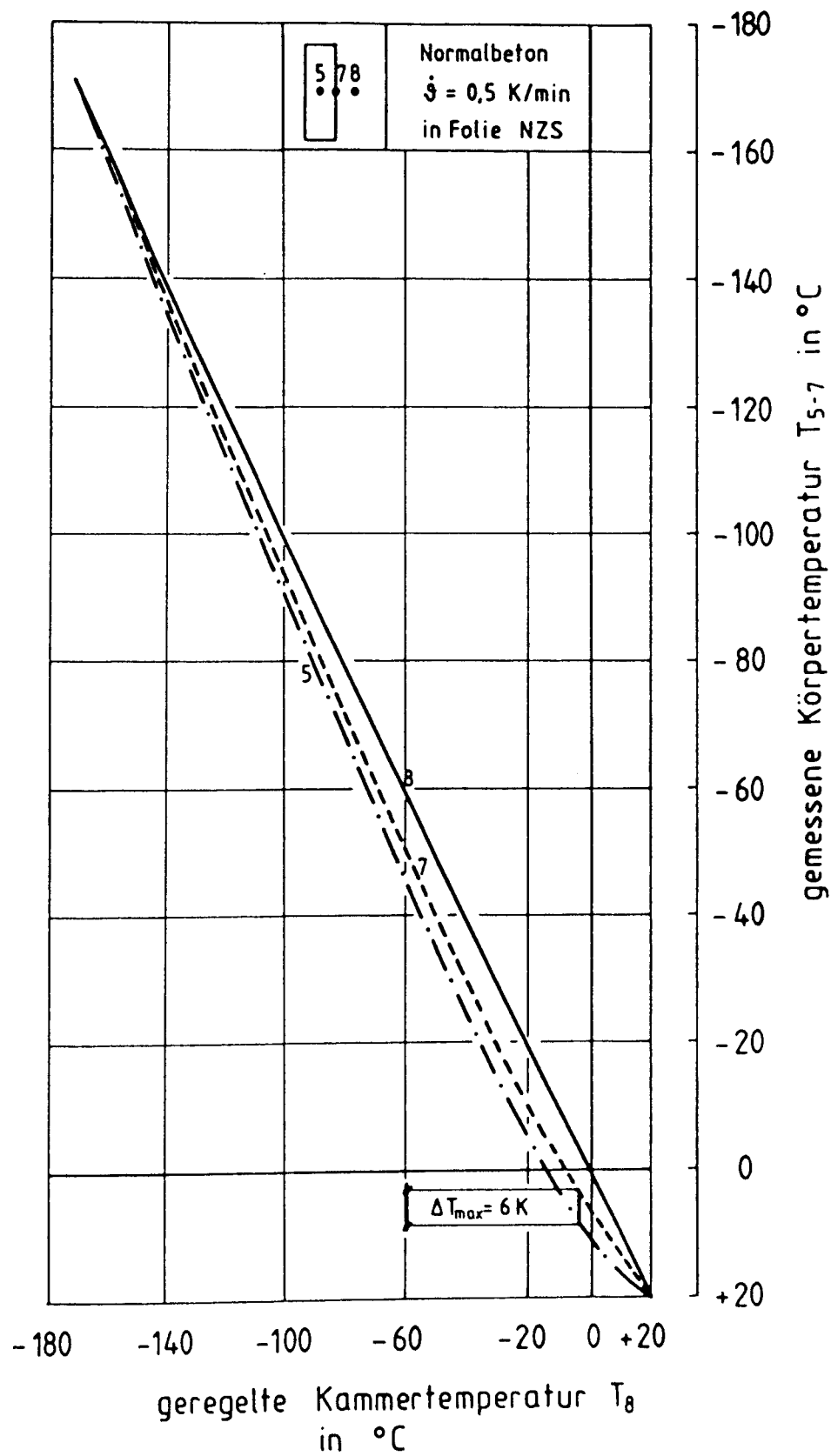


Bild 6.1 Gemessene Körpertemperatur von Normalbeton bei tiefen Temperaturen

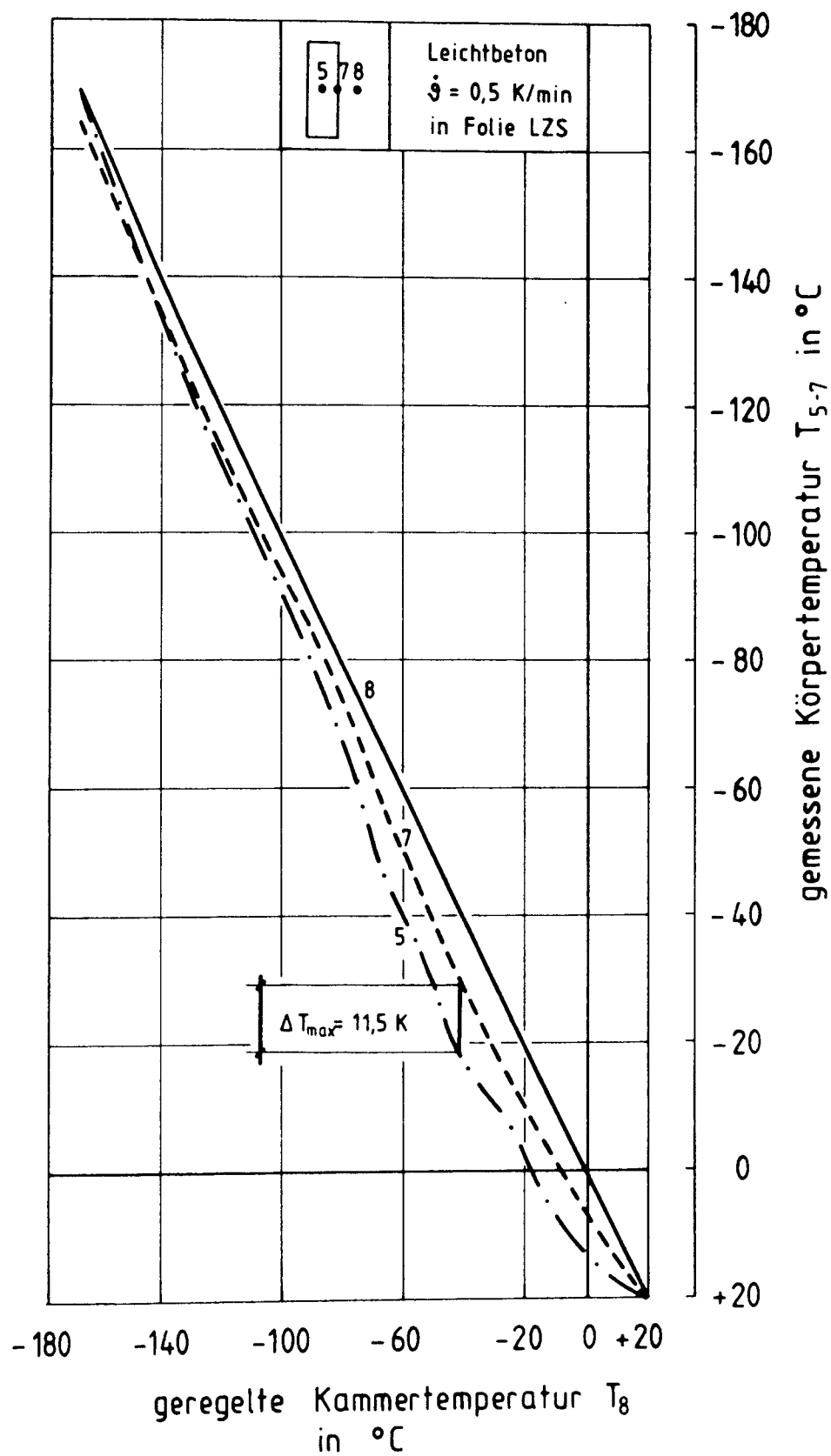


Bild 6.2 Gemessene Körpertemperatur von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen

6.2 Ergebnisse der Druckversuche

6.2.1 Druckfestigkeit

Normalbeton (Bild 6.3)

Bei Raumtemperatur liegen die Werte der Druckfestigkeit für die normalklimagelagerten Versuchskörper mit 53 N/mm^2 über denen der foliengelagerten Versuchskörper mit 45 N/mm^2 . Im Tieftemperaturbereich zeigen die foliengelagerten Versuchskörper eine größere Festigkeitssteigerung als die normalklimagelagerten. Die maximalen Werte der Druckfestigkeit werden vom foliengelagerten Normalbeton bei -135°C mit 135 N/mm^2 erreicht. Der normalklimagelagerte Normalbeton erreicht bei -170°C seine maximalen Werte bei 120 N/mm^2 .

Leichtbeton (Bild 6.4)

Bei Raumtemperatur liegen die Werte der Druckfestigkeit des normalklimagelagerten Leichtbetons mit 60 N/mm^2 über denen des foliengelagerten mit 55 N/mm^2 . Im Tieftemperaturbereich liegen die gemessenen Werte durchweg unterhalb der beim Normalbeton ermittelten Werte der Druckfestigkeit. Die foliengelagerten Versuchskörper zeigen im Tieftemperaturbereich bis -80°C einen steilen Anstieg der Druckfestigkeitswerte auf 100 N/mm^2 . Mit weiter sinkenden Temperaturen bleiben die Druckfestigkeitswerte konstant. Der normalklimagelagerte Leichtbeton erreicht bei -170°C mit 85 N/mm^2 seine maximalen Werte. Auch beim Leichtbeton ist der Anstieg der Druckfestigkeitswerte bei den normalklimagelagerten Versuchskörpern geringer als bei den foliengelagerten.

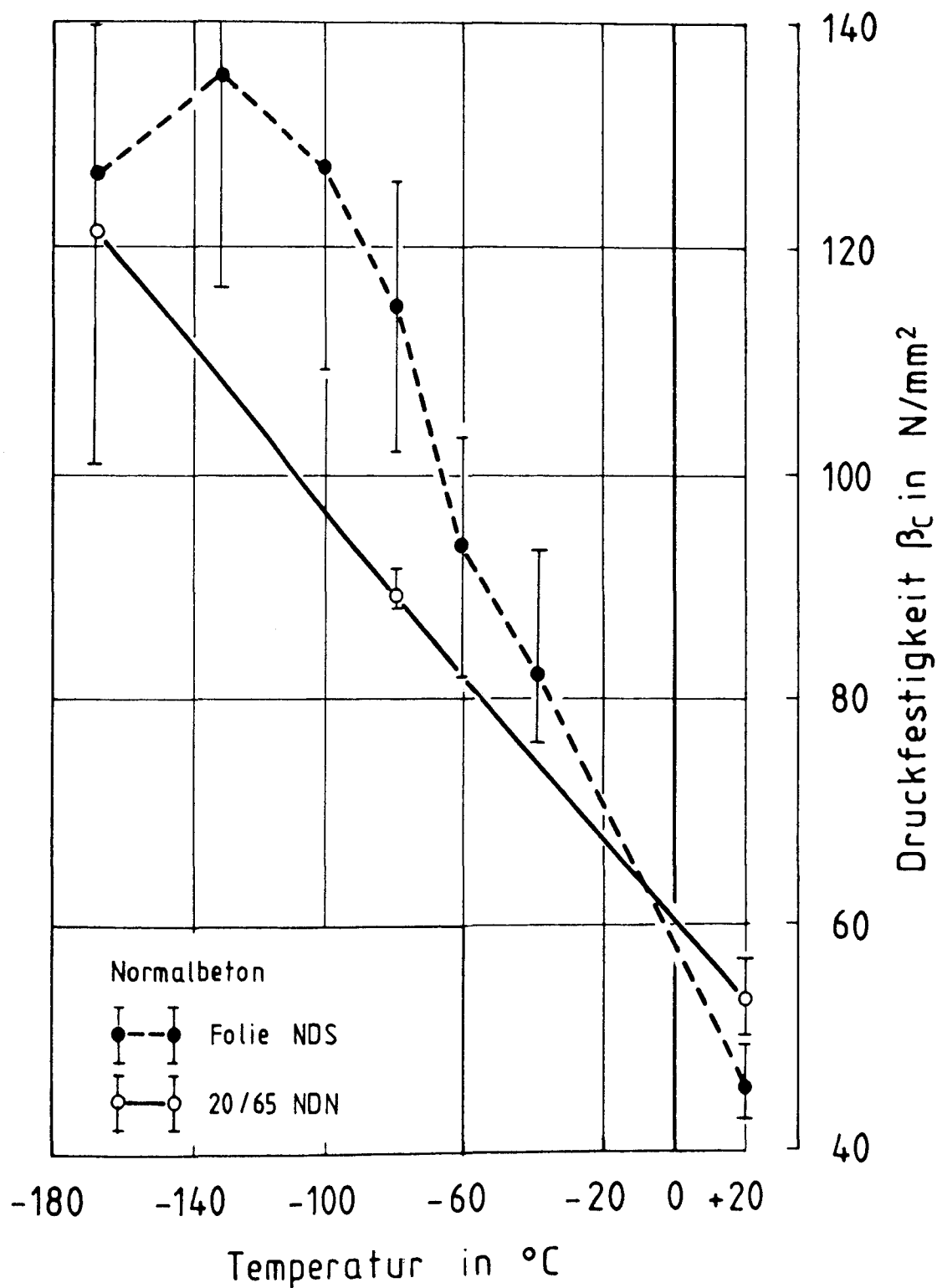


Bild 6.3

Druckfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

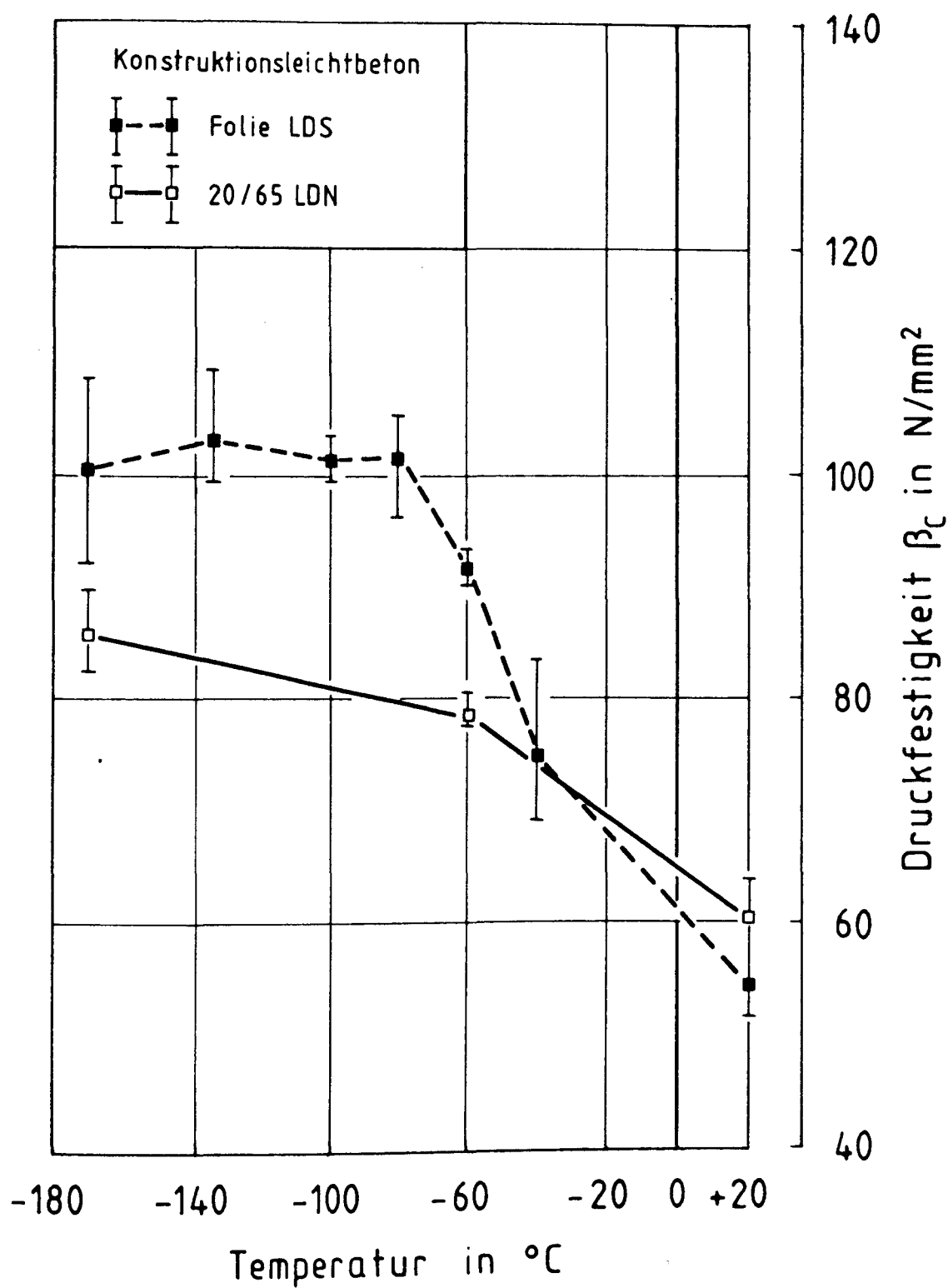


Bild 6.4. Druckfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

6.2.2 Druckbruchdehnung

Normalbeton (Bild 6.5)

Die bei Raumtemperatur gemessenen Bruchdehnungen liegen bei -2,7 % für die foliengelagerten und bei -3,0 % für die normalklimagelagerten Versuchskörper. Bei -170°C zeigen die normalklimagelagerten Versuchskörper einen geringen Abfall der Bruchdehnungswerte auf -2,9 %. Bei den foliengelagerten Versuchskörpern zeigen die bei -170°C gemessenen Werte keine Veränderung gegenüber den Raumtemperaturwerten. Weitere Temperaturstufen wurden nicht untersucht.

Leichtbeton (Bild 6.6)

Die gemessenen Werte der Bruchdehnung liegen beim Leichtbeton durchweg höher als beim Normalbeton. Bei Raumtemperatur erreicht der normalklimagelagerte Leichtbeton Werte von -3,5 %, der foliengelagerte Werte von -3,1 %. Im Tieftemperaturbereich zeigen beide Lagerungsbedingungen einen geringen Anstieg der Bruchdehnungswerte auf -3,7 % beim normalklimagelagerten und -3,2 % beim foliengelagerten Leichtbeton. Für den normalklimagelagerten Leichtbeton liegt jedoch bei -170°C nur ein Meßwert vor.

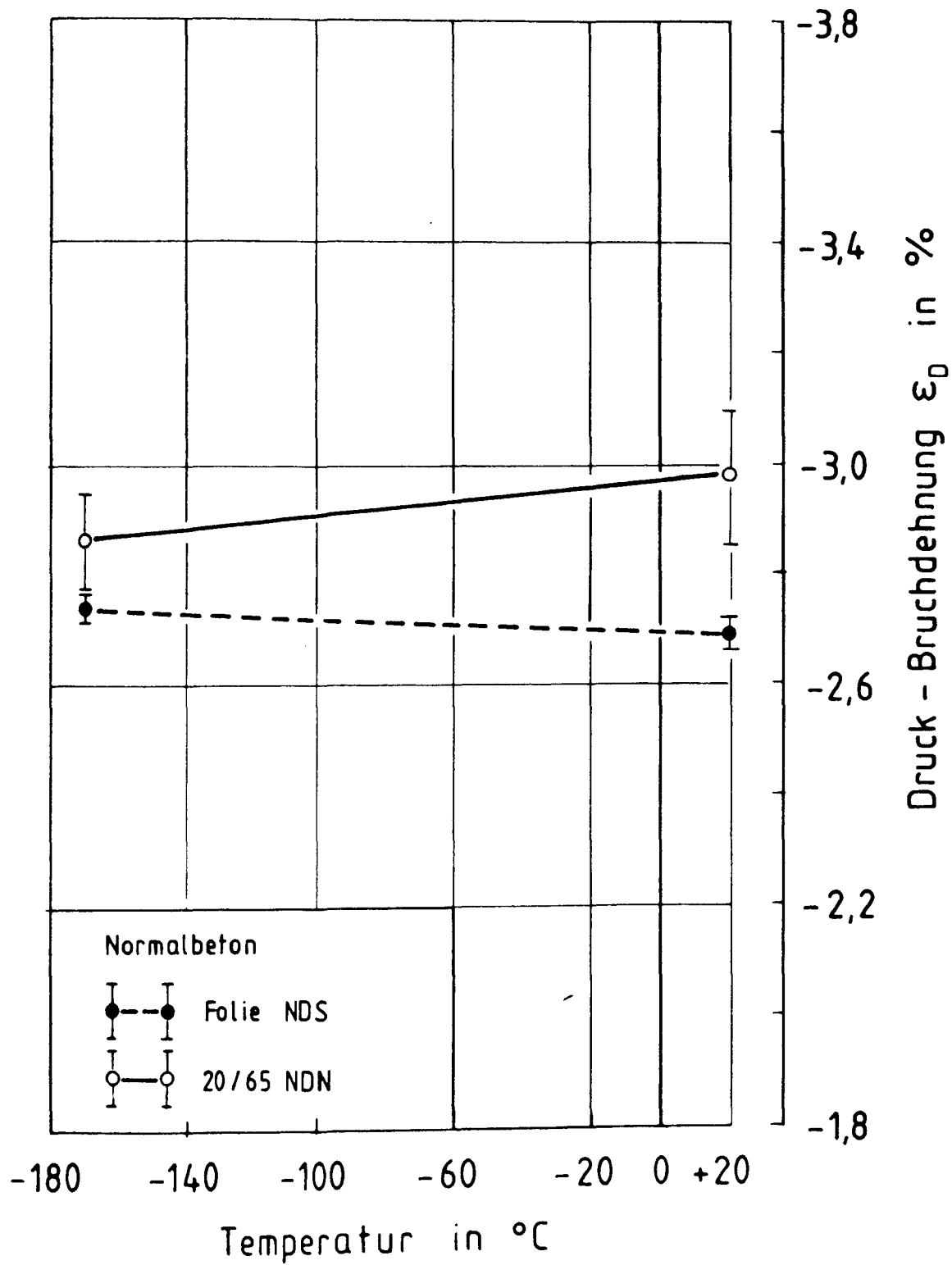


Bild 6.5 Druckbruchdehnung von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

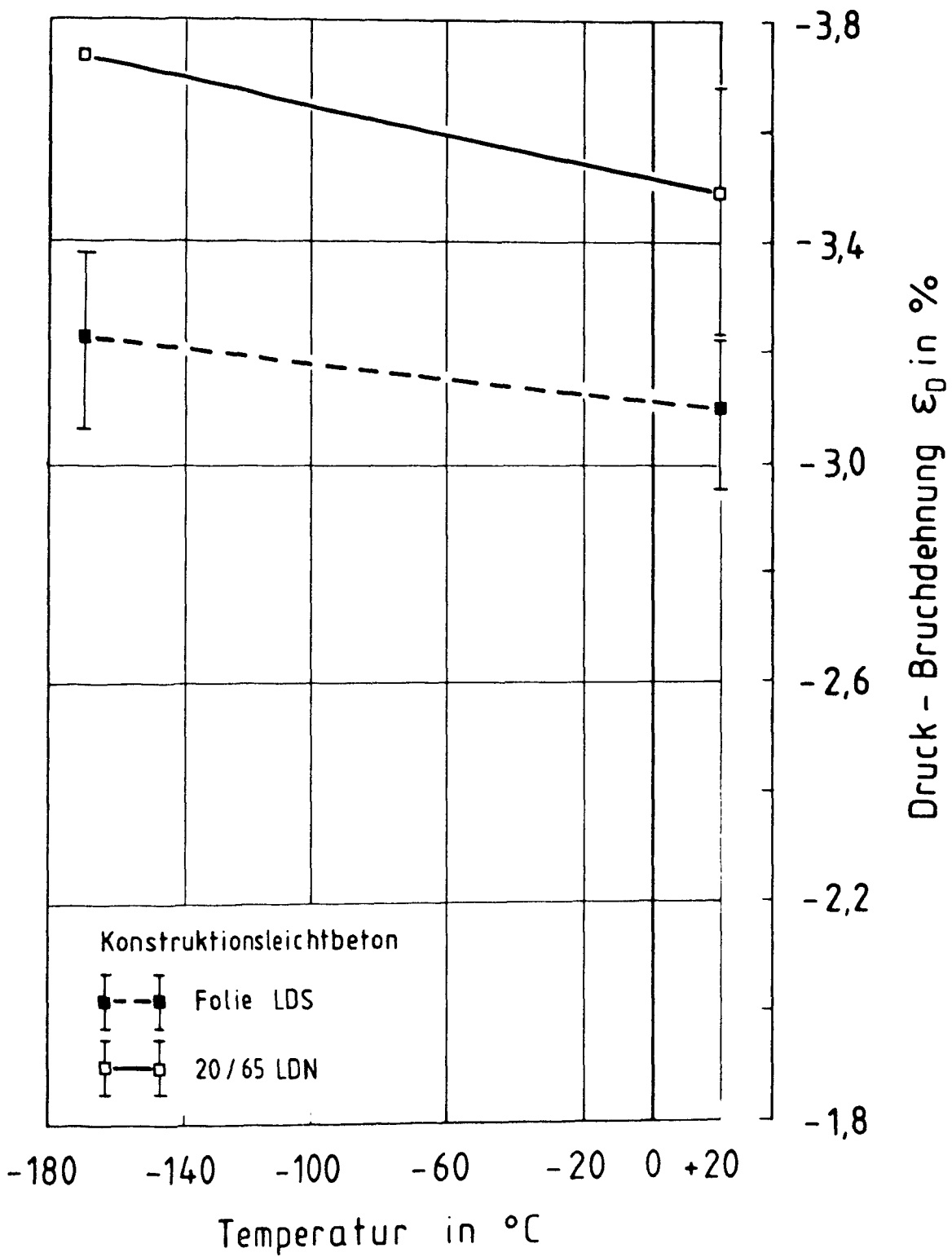


Bild 6.6 Druckbruchdehnung von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

6.2.3 Druck-E-Modul

Normalbeton (Bild 6.7)

Bei Raumtemperatur ist kein Einfluß der Lagerungsbedingungen auf den E-Modul feststellbar. Die gemessenen Werte liegen bei 27500 N/mm^2 . Im Tieftemperaturbereich zeigen die foliengelagerten Versuchskörper einen steileren Anstieg als die normalklimagelagerten. Bei -170°C erreicht der foliengelagerte Normalbeton E-Modul-Werte von 52500 N/mm^2 , der normalklimagelagerte 44000 N/mm^2 .

Leichtbeton (Bild 6.8)

Die beim Leichtbeton gemessenen Werte des E-Moduls liegen durchweg unter denen des Normalbetons. Ein geringer Einfluß der Lagerung ist hier sowohl bei Raumtemperatur wie bei Tieftemperatur feststellbar. Im Mittel liegen die Werte bei Raumtemperatur bei 20000 N/mm^2 , bei -170°C bei 30000 N/mm^2 . Bei -170°C lag für den normalklimagelagerten Leichtbeton nur ein Meßwert vor.

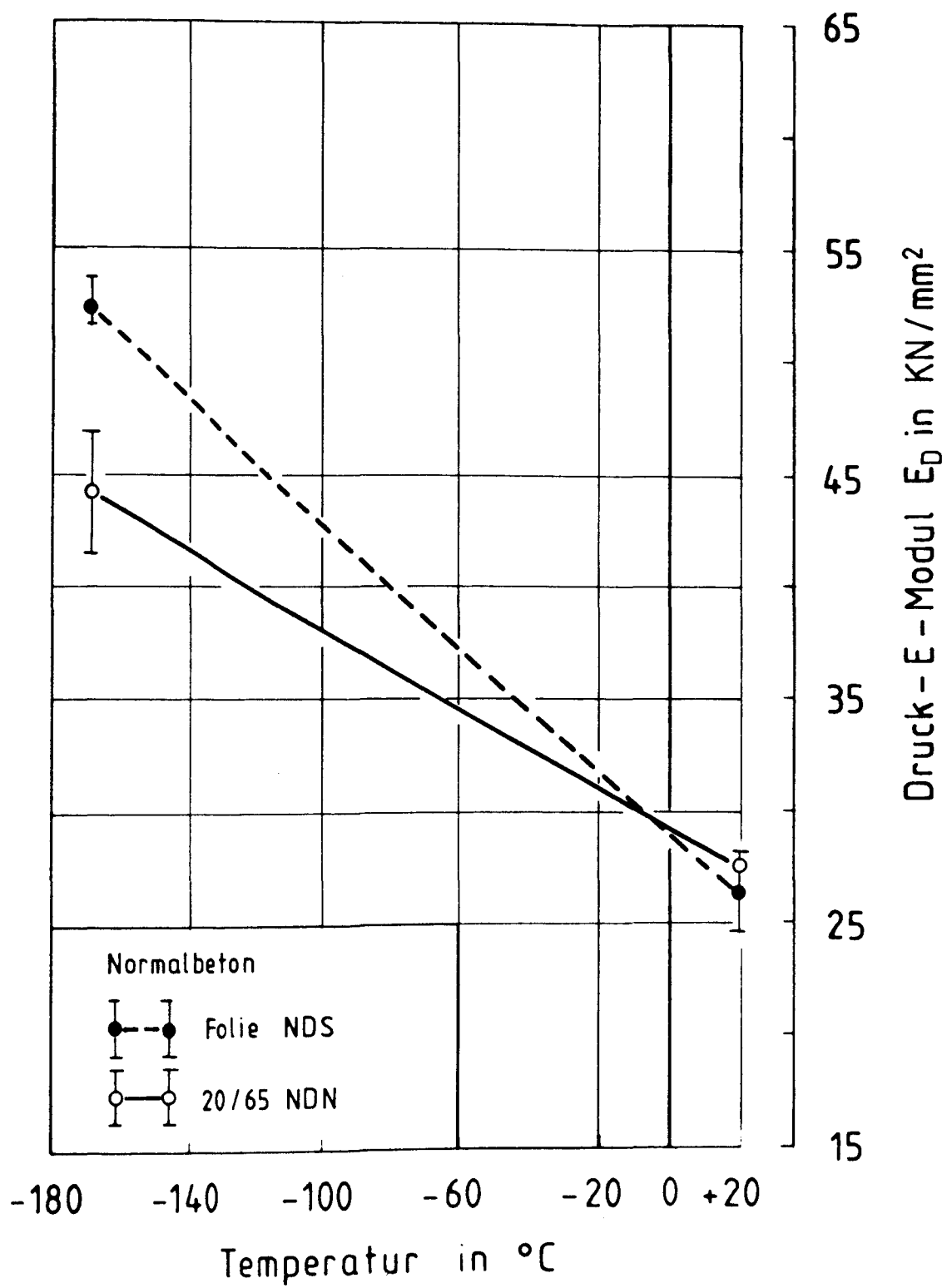


Bild 6.7

Druck-E-Modul von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

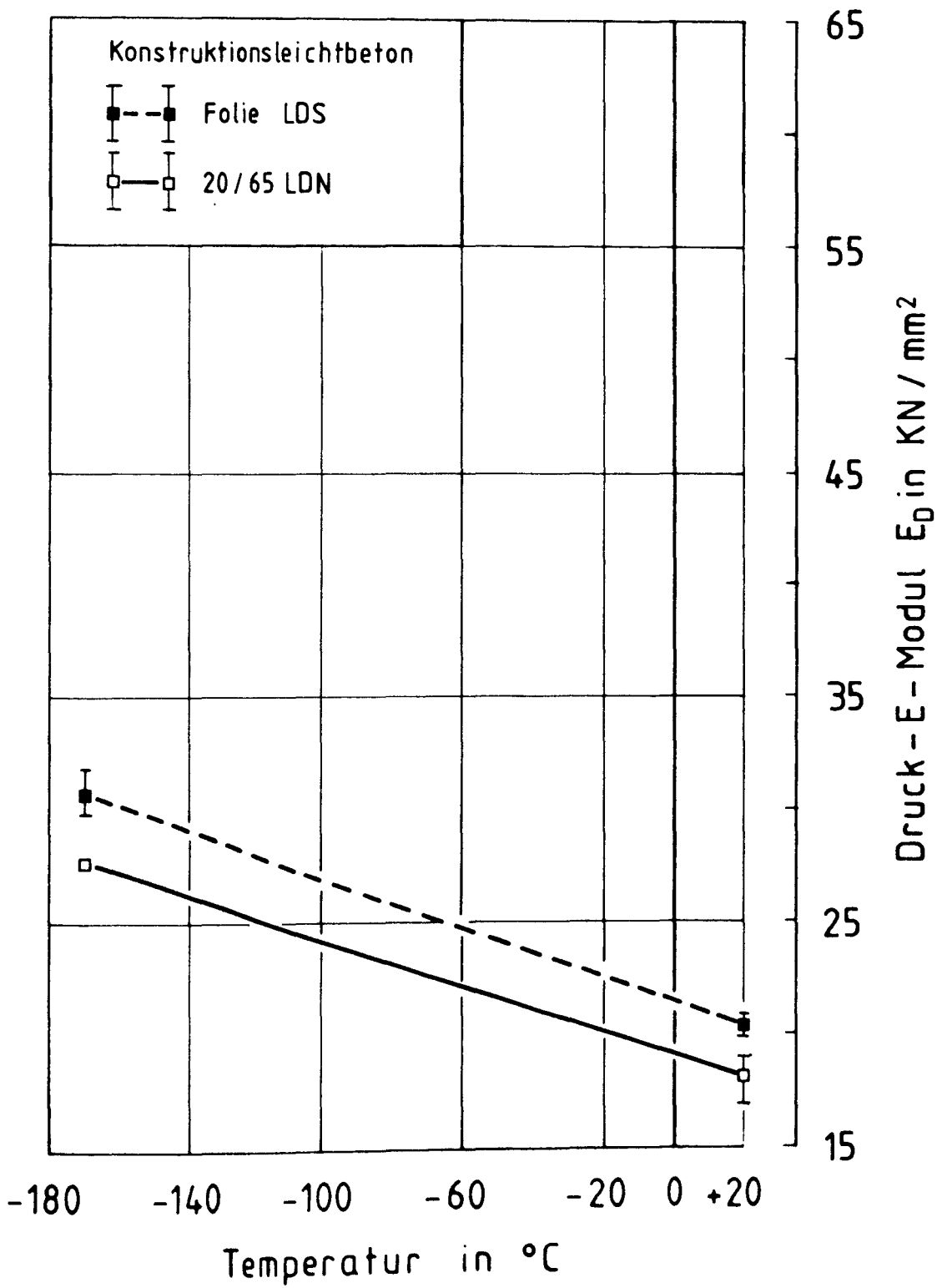


Bild 6.8 Druck-E-Modul von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

6.3 Ergebnisse der Spaltzugversuche

6.3.1 Spaltzugfestigkeit

Normalbeton (Bild 6.9)

Bei Raumtemperatur zeigen foliengelagerter und normalklimagelagerter Normalbeton mit 5 N/mm^2 gleiche Werte für die Spaltzugfestigkeit. Im Tieftemperaturbereich liegen die Werte des normalklimagelagerten Normalbetons unter denen des foliengelagerten, die Kurvenverläufe sind dabei gleichartig. Beide Kurvenverläufe haben bei -100°C ein Maximum, die erreichten Werte sind 12 N/mm^2 bei Folienlagerung und 10 N/mm^2 bei Normalklimalagerung. Beide Kurvenverläufe zeigen bei weiter sinkender Temperatur abfallende Werte für der Spaltzugfestigkeit. Bei -170°C betragen die Werte 10 N/mm^2 bzw. 8 N/mm^2 .

Leichtbeton (Bild 6.10)

Der Einfluß der Temperatur auf die Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton ist gegenüber Normalbeton sehr gering. Bei Raumtemperatur zeigen foliengelagerte und normalklimagelagerte Versuchskörper Werte der Spaltzugfestigkeit von 4 N/mm^2 . Beim normalklimagelagerten Leichtbeton bleibt die Spaltzugfestigkeit im Tieftemperaturbereich nahezu unverändert, sie beträgt bei -170°C $4,5 \text{ N/mm}^2$. Beim foliengelagerten Leichtbeton steigt die Spaltzugfestigkeit bis -40°C auf $6,0 \text{ N/mm}^2$ an und bleibt bei weiter sinkender Temperatur konstant.

Diese Ergebnisse entsprechen den in /8/ ermittelten.

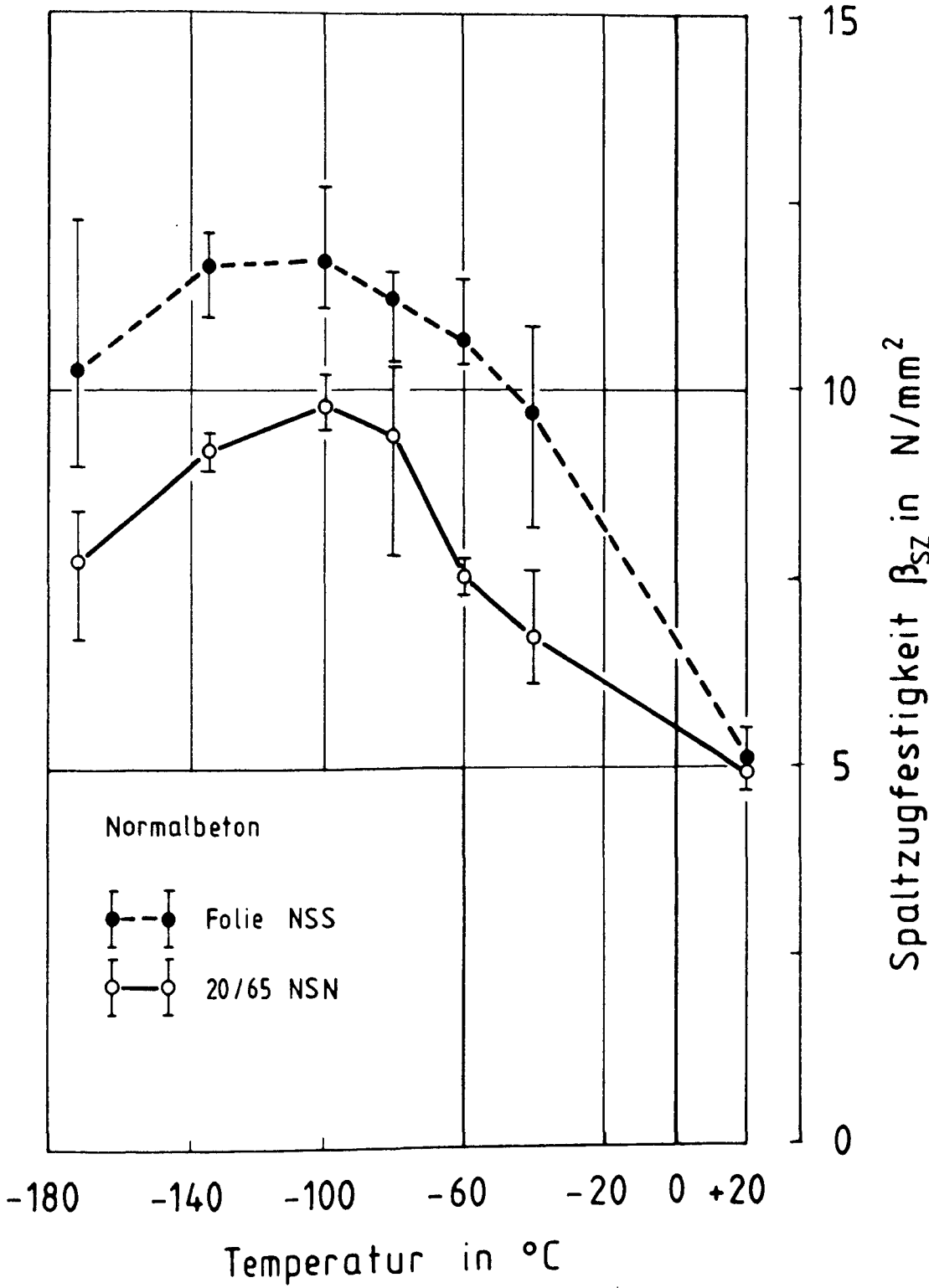


Bild 6.9 Spaltzugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

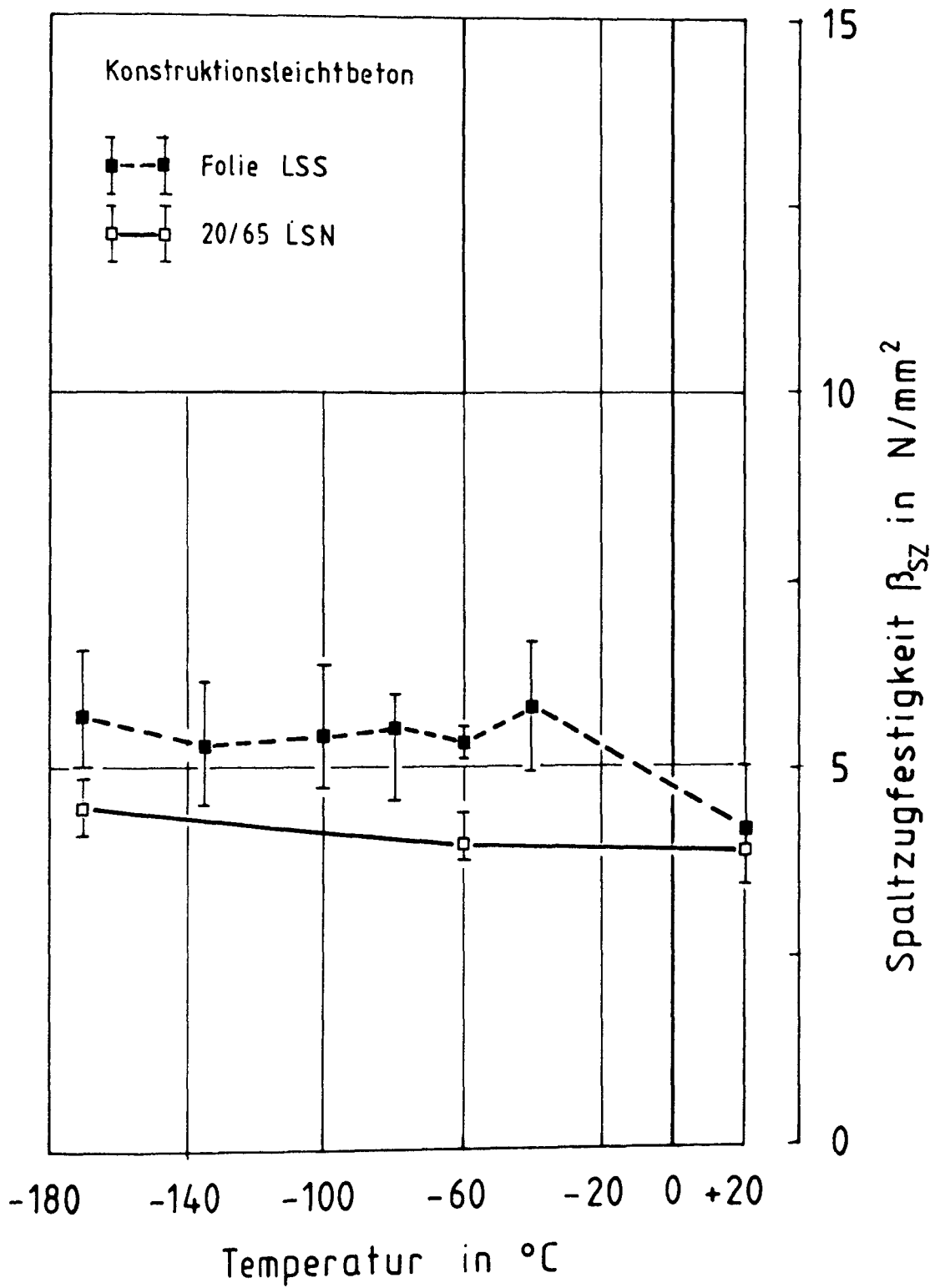


Bild 6.10 Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

6.4 Ergebnisse der Zentrischen Zugversuche

6.4.1 Zugfestigkeit

Normalbeton

Nach 28 Tagen Lagerung wurden zu Kontrollzwecken drei Versuchskörper aus der Schalung herausgeschnitten. Hierbei wurde festgestellt, daß die Versuchskörper aus Normalbeton unterhalb der oberen Verankerungsstäbe umlaufende Risse zeigten. Als Ursache hierfür werden Setzungserscheinungen im jungen Beton sowie chemisches Schwinden vermutet. Um die Versuchskörper dennoch nutzen zu können, wurden alle Normalbetonversuchskörper in der Kunststoffschalung ca. 3cm unterhalb der oberen Verankerungsstäbe naß durchgesägt. Die Schnittfläche wurde anschließend mit Folie versiegelt. Die obere Verankerung wurde durch eine aufgeklebte Stahlplatte ersetzt. Bei den Versuchskörpern aus Leichtbeton wurden keine Risse festgestellt.

Die Bruchflächen traten beim Normalbeton streuend innerhalb der gesamten Versuchskörperlänge auf. Es traten sowohl Brüche auf der freien Länge als auch direkt unter der Klebfuge und oberhalb der unteren Verankerungsstäbe auf. Eine Zuordnung der Bruchstelle zu einer Temperaturstufe ist dabei nicht möglich. Die auf freier Länge gebrochenen Versuchskörper erzielten im Mittel die höchsten Festigkeitswerte. Versuchskörper, die in der Klebfuge versagten, zeigten deutlich geringere Werte und wurden daher nicht in die Auswertung aufgenommen. Die Ergebnisse der direkt über den unteren Verankerungsstäben versagenden Versuchskörper lagen zumeist im Streubereich der auf freier Länge gebrochenen Versuchskörper und wurden dann in die Auswertung mit aufgenommen.

Bei Raumtemperatur wurden für den Normalbeton Werte der zentrischen Zugfestigkeit von $2,5 \text{ N/mm}^2$ bei geringer Streuung ermittelt. Dies entspricht etwa 50 % der Spaltzugfestigkeit und 5 % der Druckfestigkeit. Die Ursache für die geringen Werte liegt in der Form und Größe des verwendeten Zuschlags sowie in dem Verhältnis Betonierrichtung zu Kraftrichtung. Bild 6.11 zeigt Zuschlagskörner der Korngruppe 8 - 16 mm. Man erkennt, daß es sich um ein sehr plattiges Korn mit stark unterschiedlichen Durchmessern handelt. Die Form der Versuchskörper bedingt eine stehende Betonage, d.h. bei zentrischem Zug entspricht die Betonierrichtung der Kraftrichtung. Bei der Verdichtung legen sich die großen Körner senkrecht zur Versuchskörperachse und bilden so für die Zugkraft "Fehlstellen" im Querschnitt. Bild 6.12 zeigt drei Bruchflächen auf freier Länge



Bild 6.11 Zuschlagskörner der verwendeten Korngruppe 8 - 16 mm

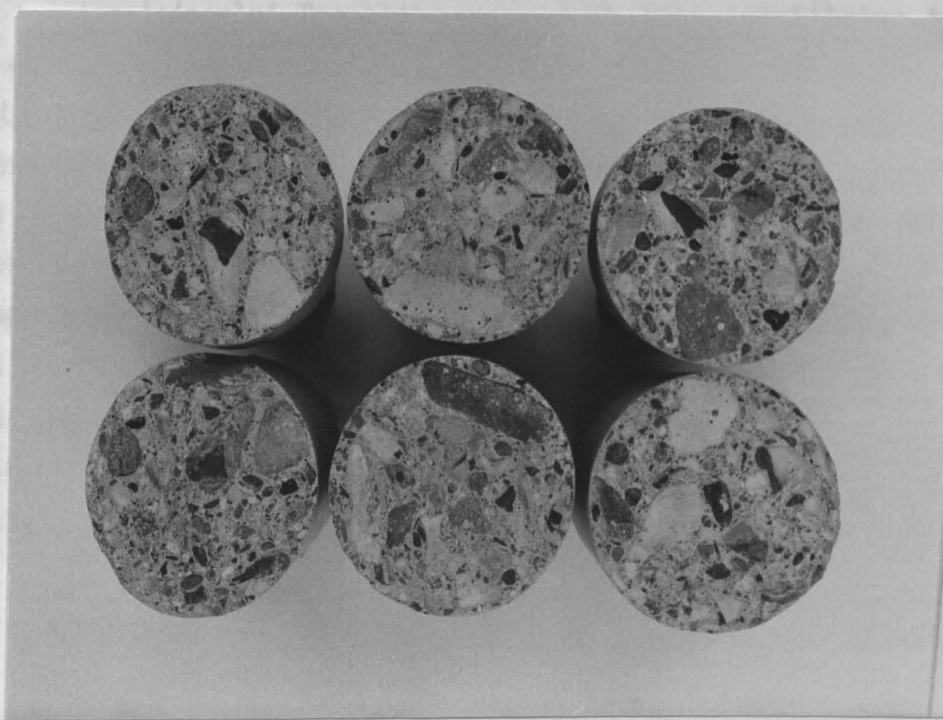


Bild 6.12 Bruchflächen der zentrischen Zugkörper aus Normalbeton

bei Raumtemperatur. Es ist deutlich zu sehen, daß erhebliche Flächenanteile des Querschnitts auf Haftung der senkrecht zur Kraftrichtung stehenden Zwischenschicht zwischen Grobkorn und Zementstein versagten. Von den drei Anteilen, die die Zugfestigkeit von Normalbeton bestimmen (Zugfestigkeit des Zuschlags, Zugfestigkeit des Zementsteins und Haftzugfestigkeit zwischen Zuschlag und Zementstein) ist die Haftung das schwächste Glied. Ferner führen große, senkrecht zur Kraftrichtung liegende Zuschlagskörner zu Spannungsspitzen im Randbereich. Beide Einflüsse scheinen hier vorzuliegen und führen zu einer Verminderung der zentrischen Zugfestigkeit des Betons.

Der foliengelagerte Normalbeton zeigt folgenden Verlauf der zentrischen Zugfestigkeitswerte im Tieftemperaturbereich (Bild 6.13). Ausgehend von $2,5 \text{ N/mm}^2$ bei Raumtemperatur steigen die Werte bis $7,5 \text{ N/mm}^2$ bei -80°C an. Bei weiter sinkenden Temperaturen fallen die Werte wieder geringfügig und erreichen bei -170°C $6,0 \text{ N/mm}^2$.

Leichtbeton (Bild 6.14)

Die zu Kontrollzwecken nach 28 Tagen Lagerung ausgeschalteten Versuchskörper aus Leichtbeton zeigten keinerlei Beschädigungen. Auch beim Leichtbeton traten die Brüche auf ganzer Versuchskörperlänge auf. Versuchskörper mit Bruch außerhalb der freien Länge wurden in die Auswertung mit aufgenommen, wenn die Ergebnisse innerhalb der Streubreite lagen.

Der Einfluß der Temperatur auf die Zugfestigkeit ist beim Leichtbeton im Vergleich zum Normalbeton deutlich geringer.

Bei Raumtemperatur wurde die zentrische Zugfestigkeit des foliengelagerten Leichtbetons zu $3,2 \text{ N/mm}^2$ ermittelt, entsprechend 80 % der Spaltzugfestigkeit. Bis -40°C steigen die Werte auf $6,0 \text{ N/mm}^2$ an. Bei weiter sinkenden Temperaturen schwanken die Werte zwischen $4,0$ und $6,0 \text{ N/mm}^2$, ohne daß eine eindeutige Tendenz zu erkennen ist.

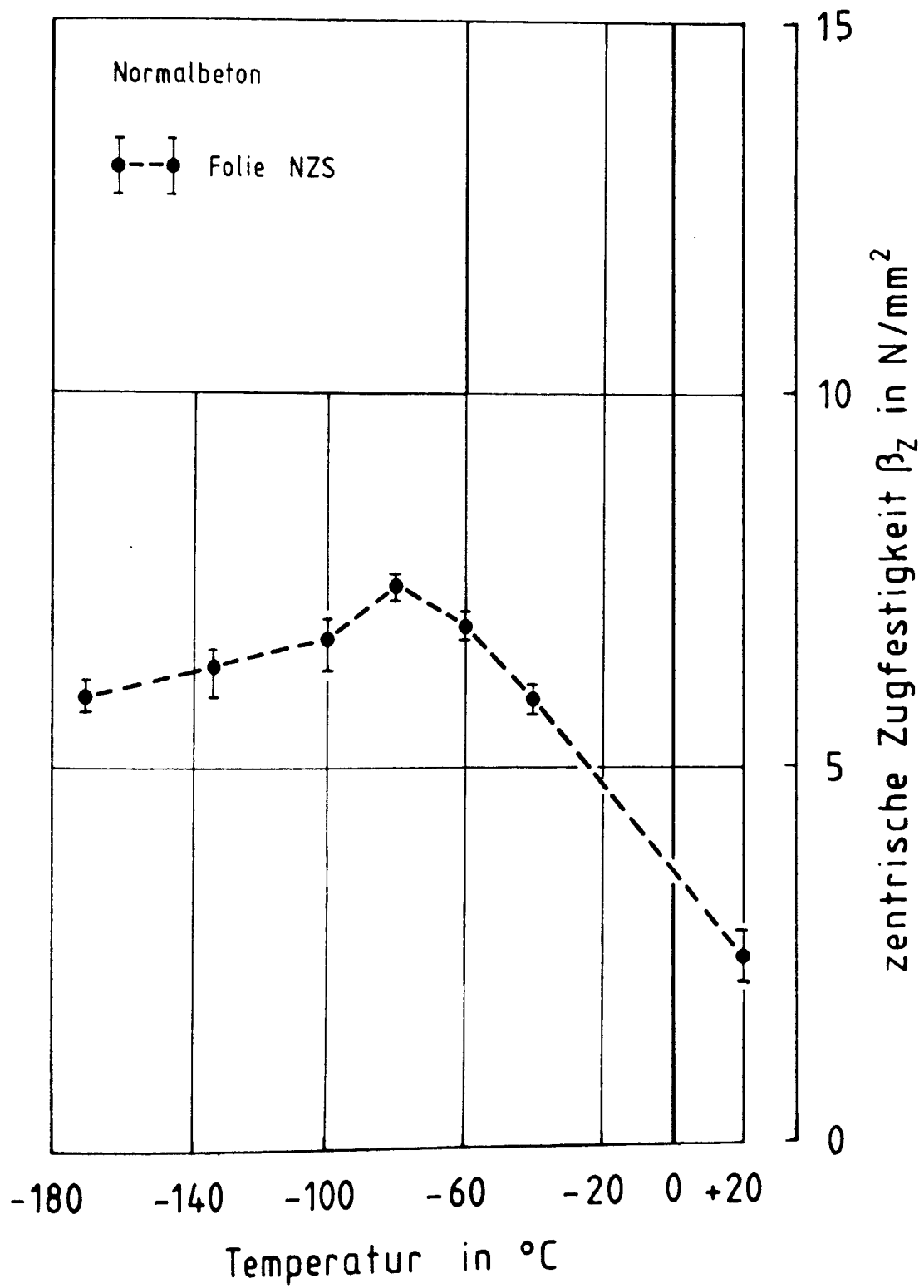


Bild 6.13

Zentrische Zugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

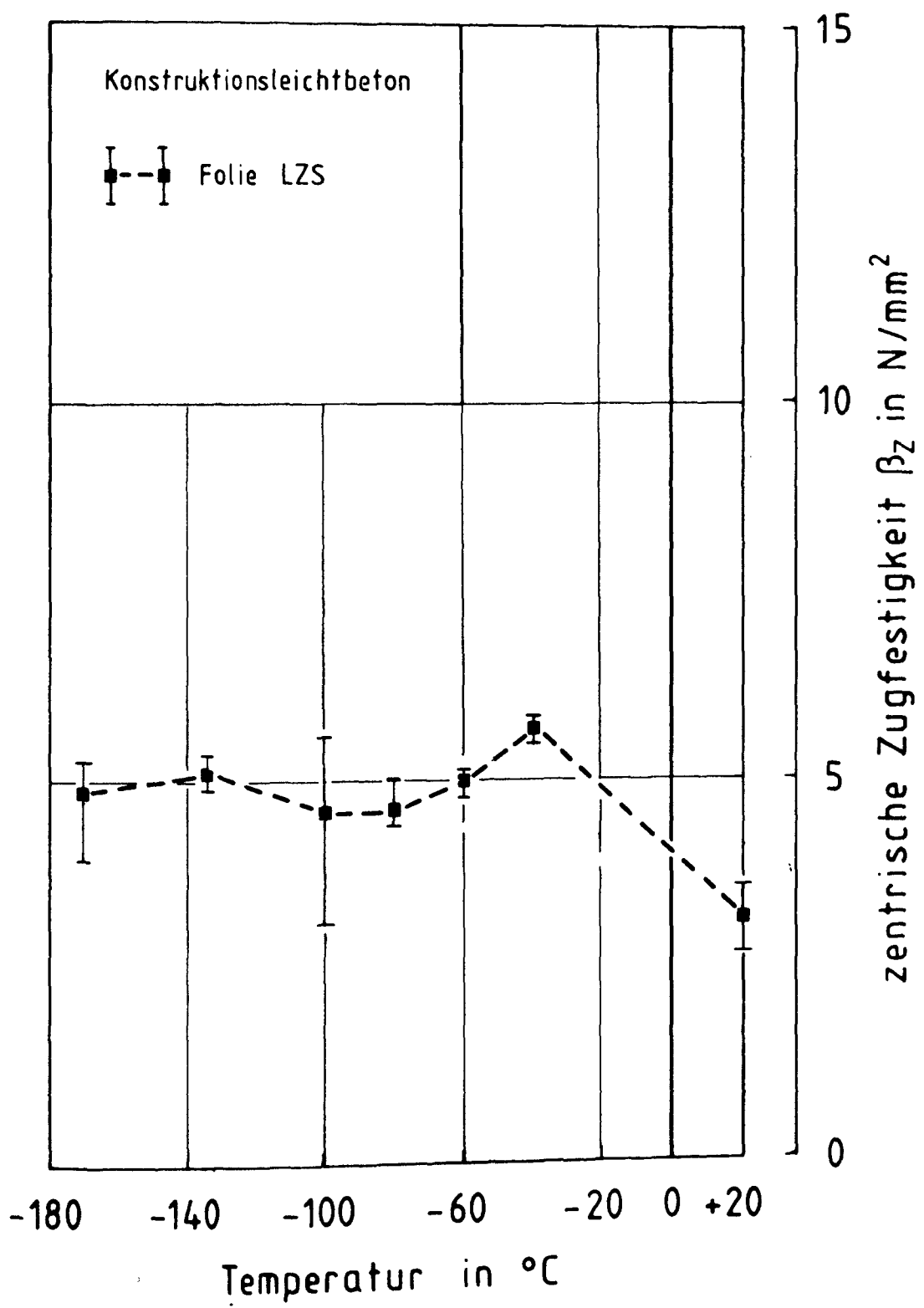


Bild 6.14 Zentrische Zugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

6.4.2 Zugbruchdehnung

Als Bruchdehnung wurde die zur Bruchlast gehörende Betondehnung aus den analog mitgeschriebenen Kraft-Verformungs-Diagrammen ermittelt.

Normalbeton (Bild 6.15)

Die bei Raumtemperatur gemessenen Bruchdehnungen des foliengelagerten Normalbetons schwanken zwischen 0,08 und 0,13 ‰. Bis -60°C steigen die Werte der Bruchdehnung auf 0,18 ‰ an. Bei weiter sinkender Temperatur fällt die Bruchdehnung wieder ab und erreicht bei -140°C die Raumtemperaturwerte.

Leichtbeton (Bild 6.16)

Die ermittelten Bruchdehnungen des foliengelagerten Leichtbetons liegen durchweg über denen des Normalbetons. Ferner zeigt der Leichtbeton bei sinkender Temperatur eine wesentlich größere Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Temperatur.

Bei Raumtemperatur liegen die Werte der Bruchdehnungen bei 0,16 ‰. Bei Tieftemperatur zeigt der foliengelagerte Leichtbeton ein ausgeprägtes Maximum von 0,33 ‰ bei -40°C. Weiter sinkende Temperaturen führen zu einem Abfall der Bruchdehnung, bei -140 °C ist das bei Raumtemperatur vorhandene Verformungsniveau wieder erreicht. Bei -170 °C liegen die Bruchdehnungen mit 0,14 ‰ unter den Raumtemperaturwerten.

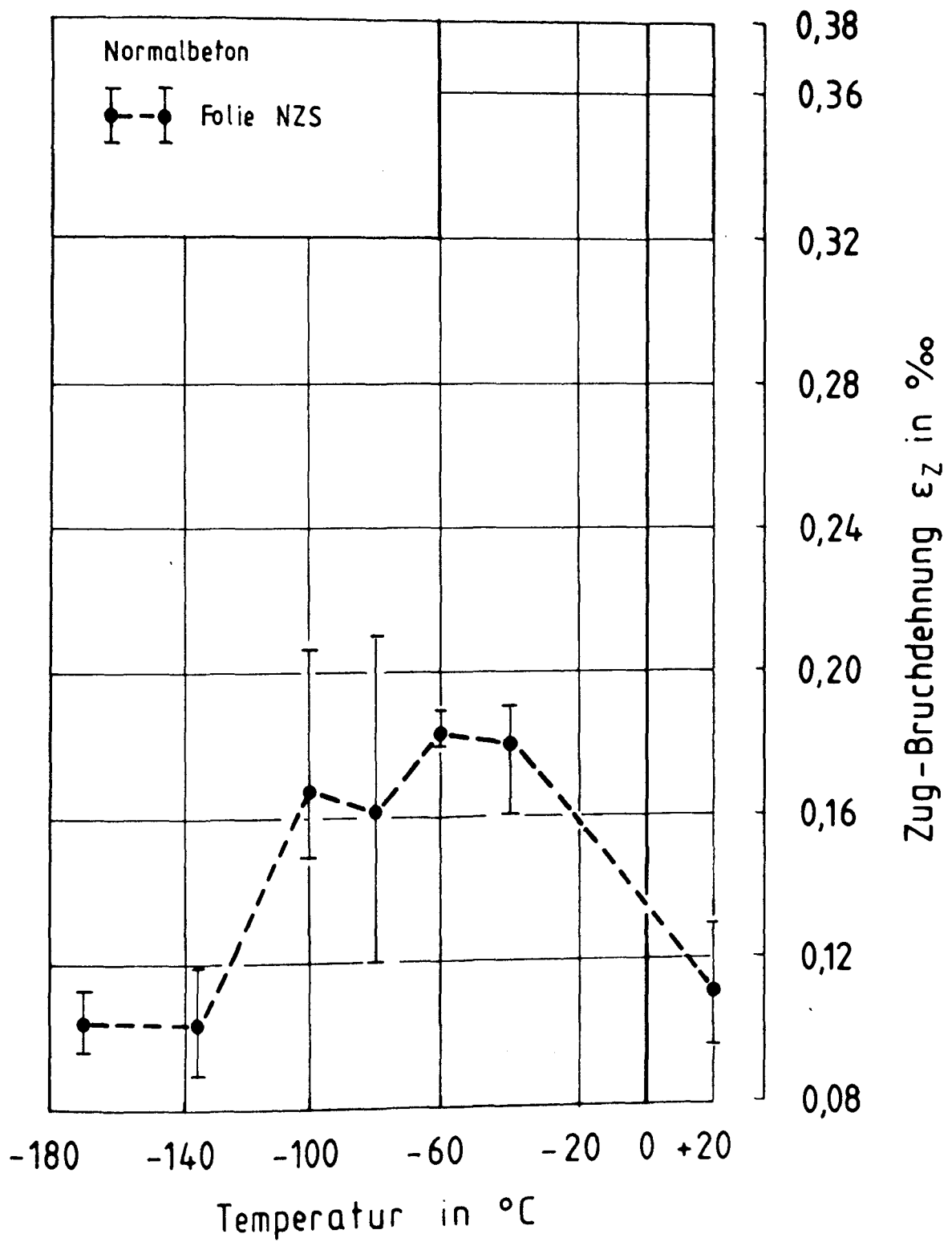


Bild 6.15

Zugbruchdehnung von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

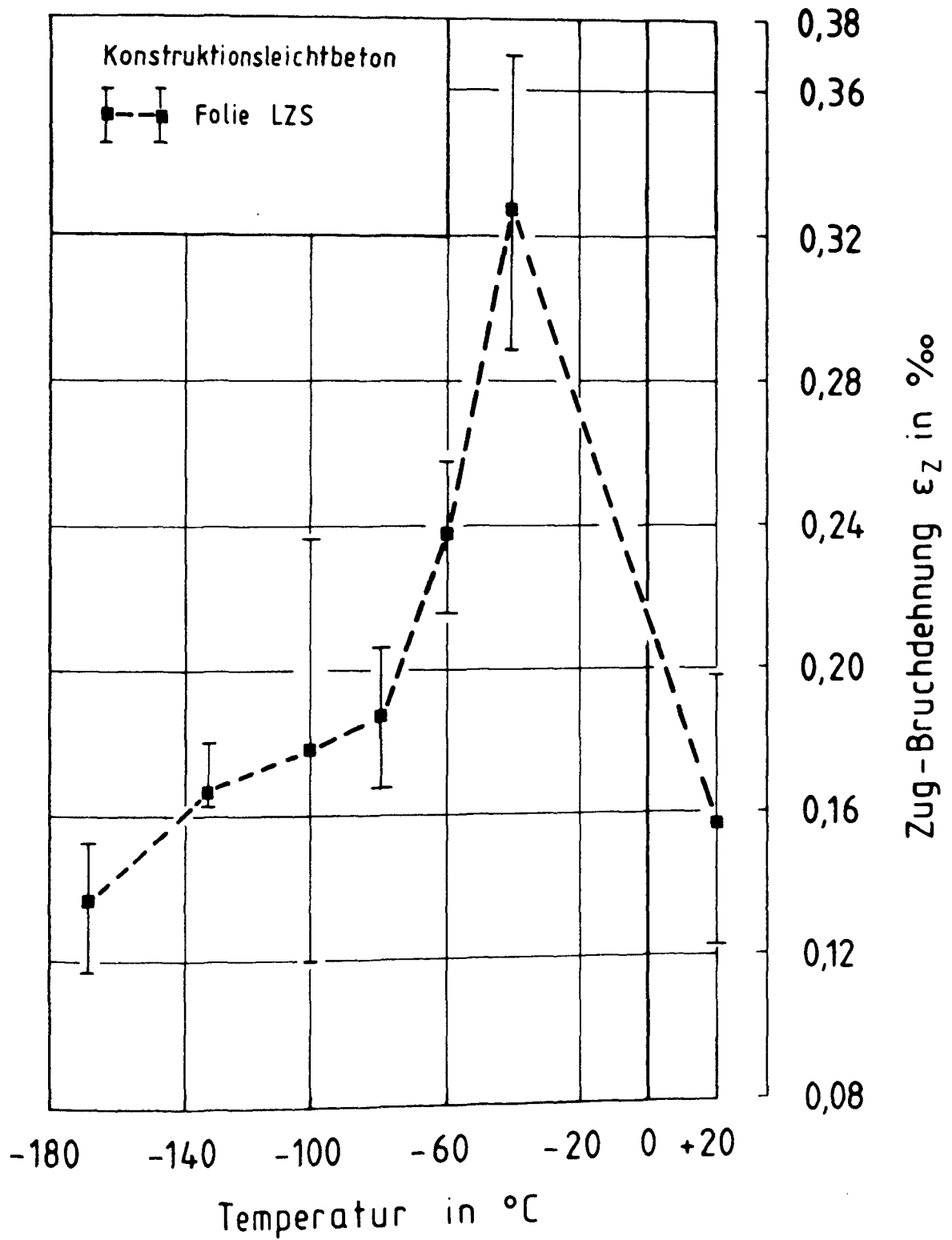


Bild 6.16

Zugbruchdehnung von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

6.4.3 Zug-E-Modul

Als Zug-E-Modul wurde die Tangentensteigung bei einem Drittel der Bruchlast graphisch aus den Kraft-Weg-Diagrammen ermittelt.

Normalbeton (Bild 6.17)

Der Zug-E-Modul des foliengelagerten Normalbetons beträgt bei Raumtemperatur im Mittel 31000 N/mm^2 . Bei sinkenden Temperaturen zeigt sich eine stetige Zunahme des Zug-E-Moduls. Bei -170°C liegen die Werte des Zug-E-Moduls bei 56000 N/mm^2 . Der Zug-E-Modul des foliengelagerten Normalbetons liegt damit bei Raum- und Tieftemperatur ca. 20 % über dem Druck-E-Modul.

Leichtbeton (Bild 6.18)

Der Zug-E-Modul des foliengelagerten Leichtbetons zeigt sowohl bei Raum- als auch bei Tieftemperatur wesentlich geringere Werte als der Normalbeton. Bei Raumtemperatur beträgt der Zug-E-Modul 19500 N/mm^2 . Zwischen Raumtemperatur und -40°C bleibt der Zug-E-Modul nahezu konstant, bei weiter sinkenden Temperaturen steigt er auf 33500 N/mm^2 bei -170°C an. Bei Raumtemperatur entspricht der Zug-E-Modul des foliengelagerten Leichtbetons damit dem Druck-E-Modul, bei Tieftemperatur liegt der Zug-E-Modul ca. 10 % über dem Druck-E-Modul.

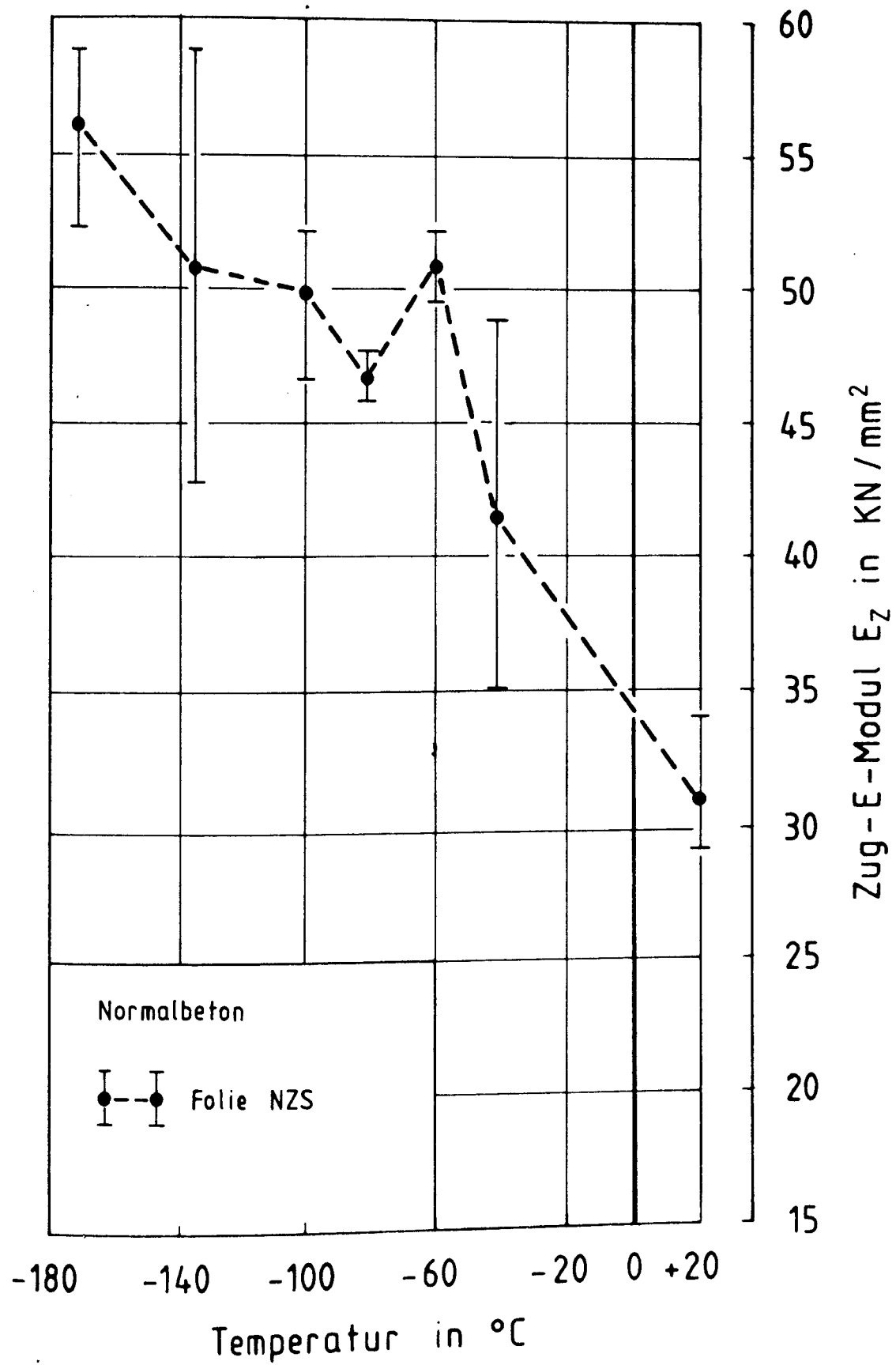


Bild 6.17

Zug-E-Modul von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

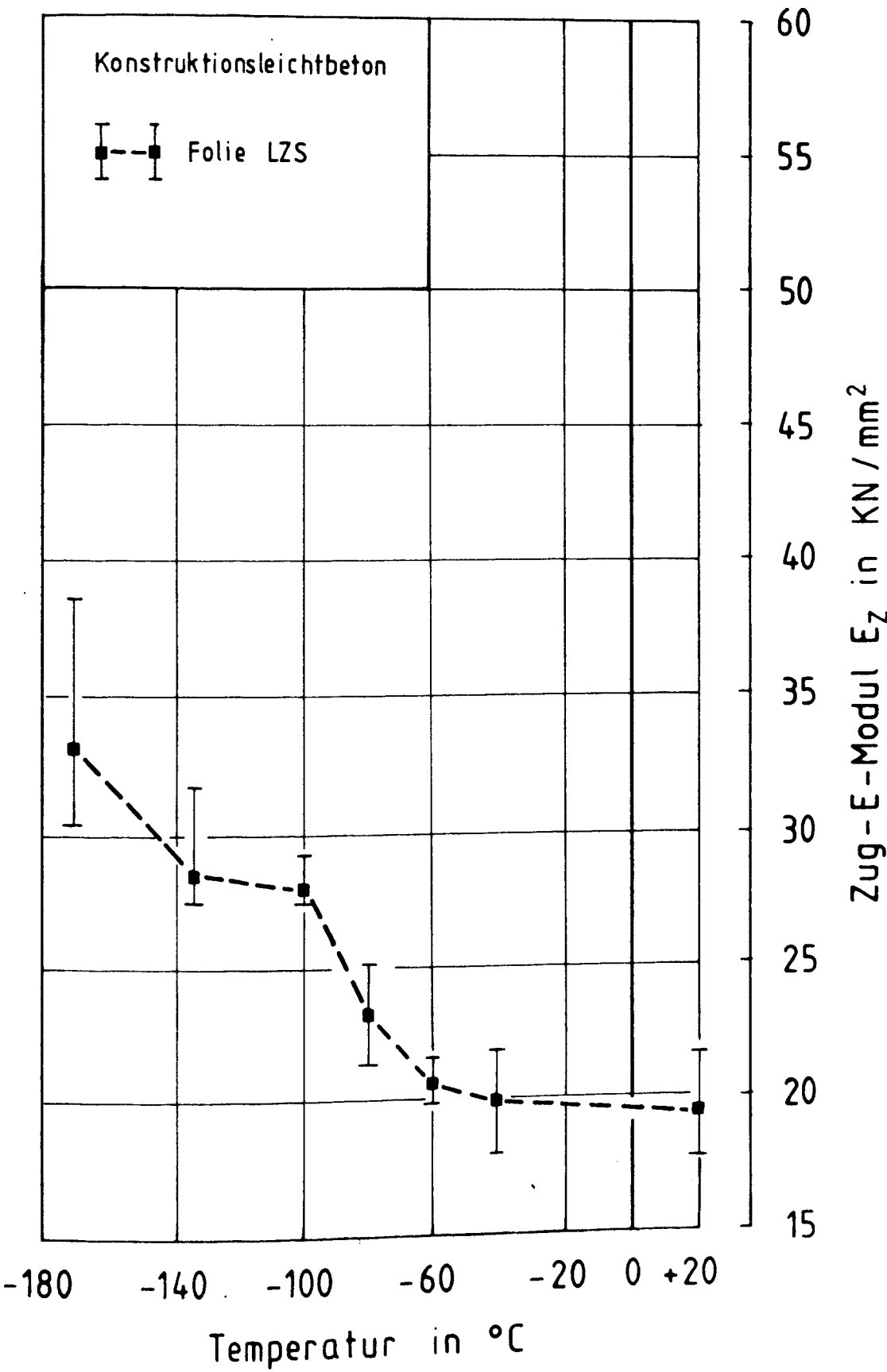


Bild 6.18

Zug-E-Modul von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

6.5 Vergleichende Darstellung der Versuchsergebnisse

In den folgenden Bildern werden die aus den verschiedenen Belastungsversuchen erhaltenen Festigkeitswerte vergleichend dargestellt. Daher wurde auf die Angabe der Streubreite verzichtet.

Normalbeton

Bild 6.19 zeigt die Werte der zentrischen und der Spaltzugfestigkeit für den foliengelagerten Normalbeton. Beide Kurven zeigen unter Berücksichtigung der Streubreiten einen ähnlichen Verlauf. Die Spaltzugfestigkeit bleibt im gesamten Temperaturbereich deutlich oberhalb der zentrischen Zugfestigkeit, die Differenz zwischen der zentrischen und der Spaltzugfestigkeit bleibt nahezu konstant. Dies weist darauf hin, daß der absolute Festigkeitsanstieg für Zentrisch Zug und Spaltzug bei foliengelagertem Normalbeton ähnlich ist.

Bild 6.20 zeigt die relativen, auf +20°C bezogenen Festigkeitswerte für foliengelagerten Normalbeton. Die Druckfestigkeitswerte und die Werte der zentrischen Zugfestigkeit steigen im Tieftemperaturbereich bis zum Dreifachen der Raumtemperaturwerte an. Die Spaltzugfestigkeitswerte zeigen hier einen deutlich geringeren Zuwachs. Bis -60°C ist der Anstieg der Spaltzug- und der zentrischen Zugfestigkeit gleich, erst bei tieferen Temperaturen wird der relative Zuwachs der zentrischen Zugfestigkeit deutlich größer. Alle drei Kurven zeigen einen abfallenden Ast.

Bild 6.21 zeigt die relativen, auf +20°C bezogenen Festigkeitswerte für den normalklimagelagerten Normalbeton. Aus dem Vergleich mit Bild 6.20 wird der Einfluß der Lagerungsbedingung deutlich. Die relativen Werte der Spaltzugfestigkeit für normalklimagelagerten Normalbeton entsprechen 75 % der Werte für Folienlagerung. Auch hier zeigt die Spaltzugfestigkeit einen abfallenden Ast.

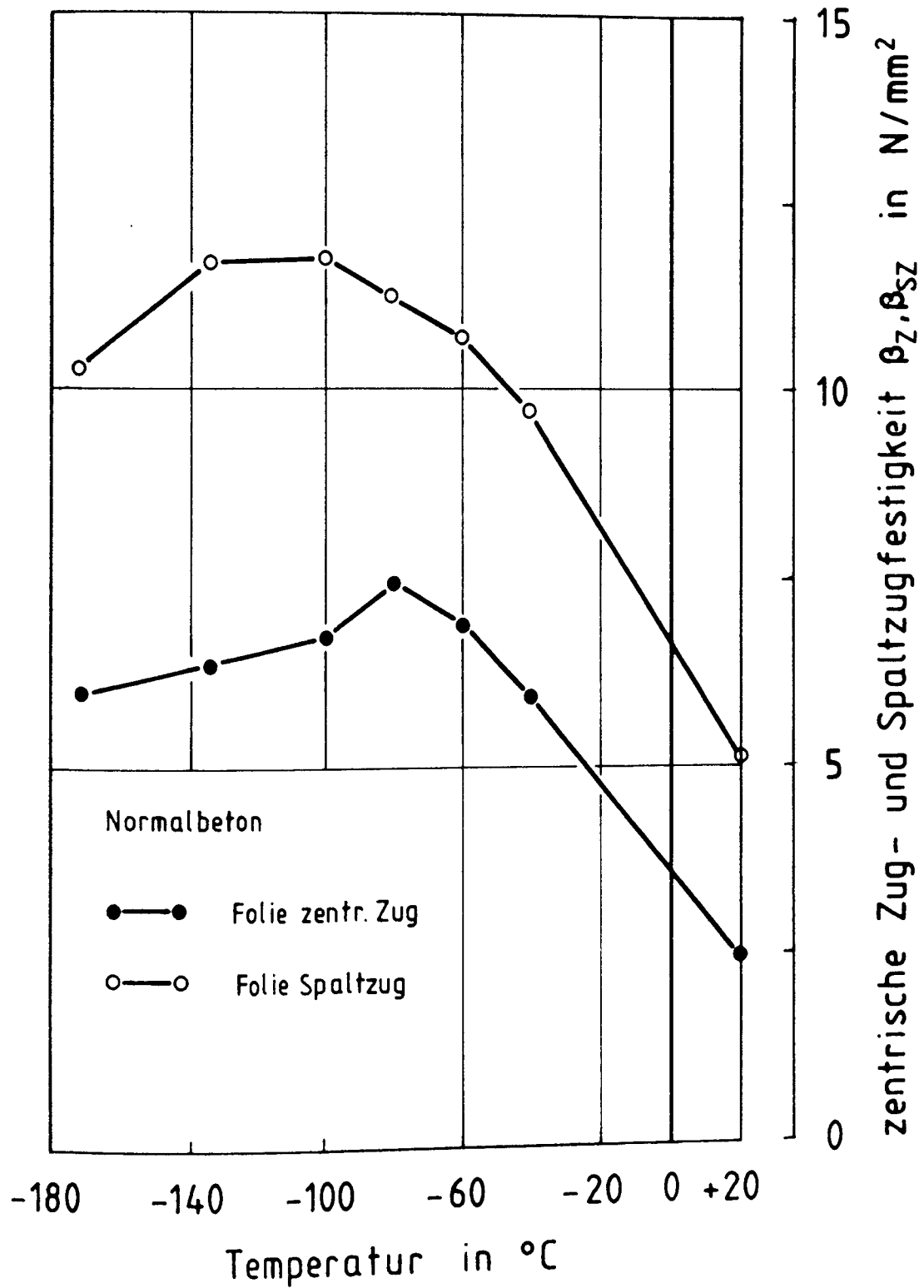


Bild 6.19

Zentrische Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

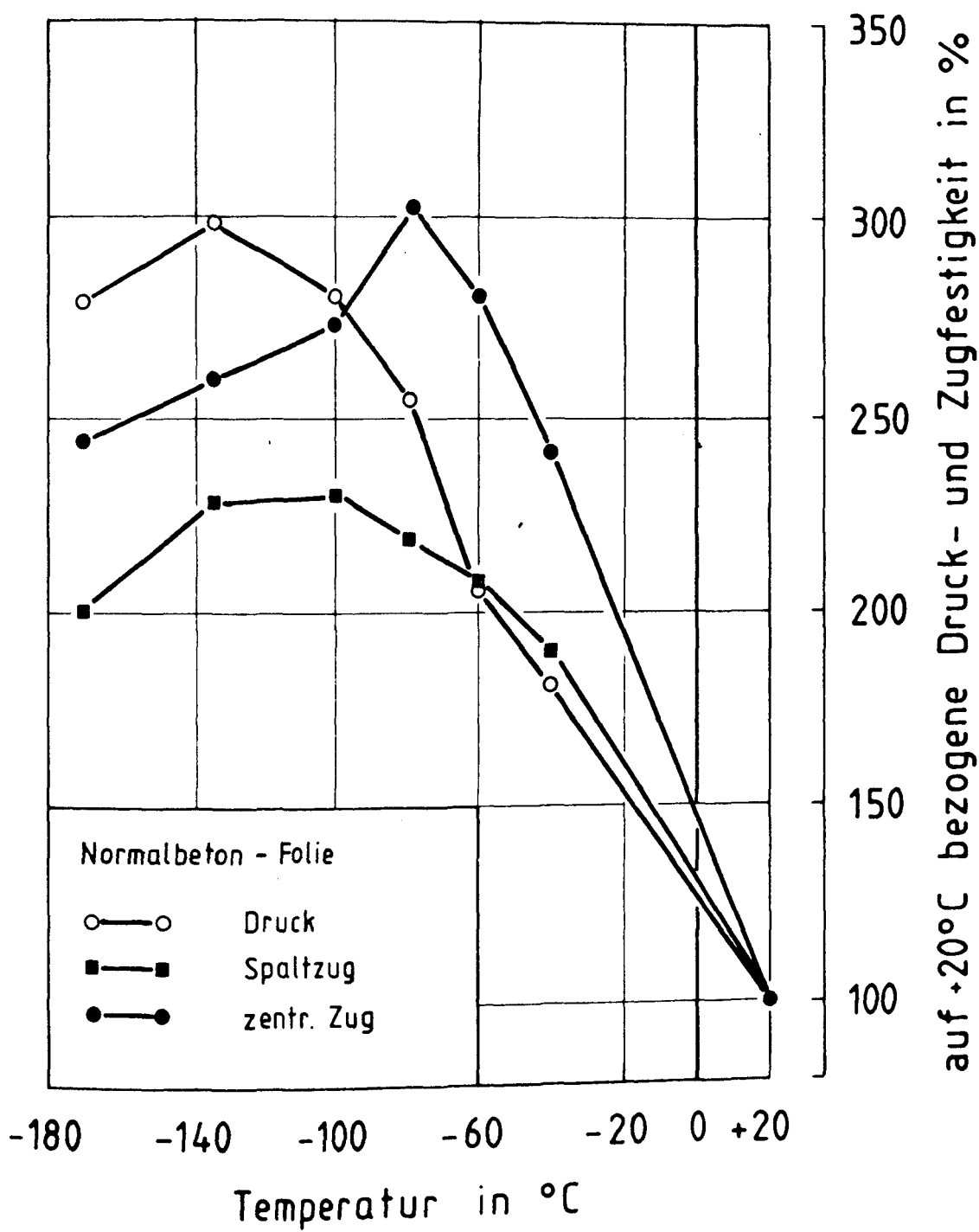


Bild 6.20 Relative Druck- und Zugfestigkeit von foliengelagertem Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

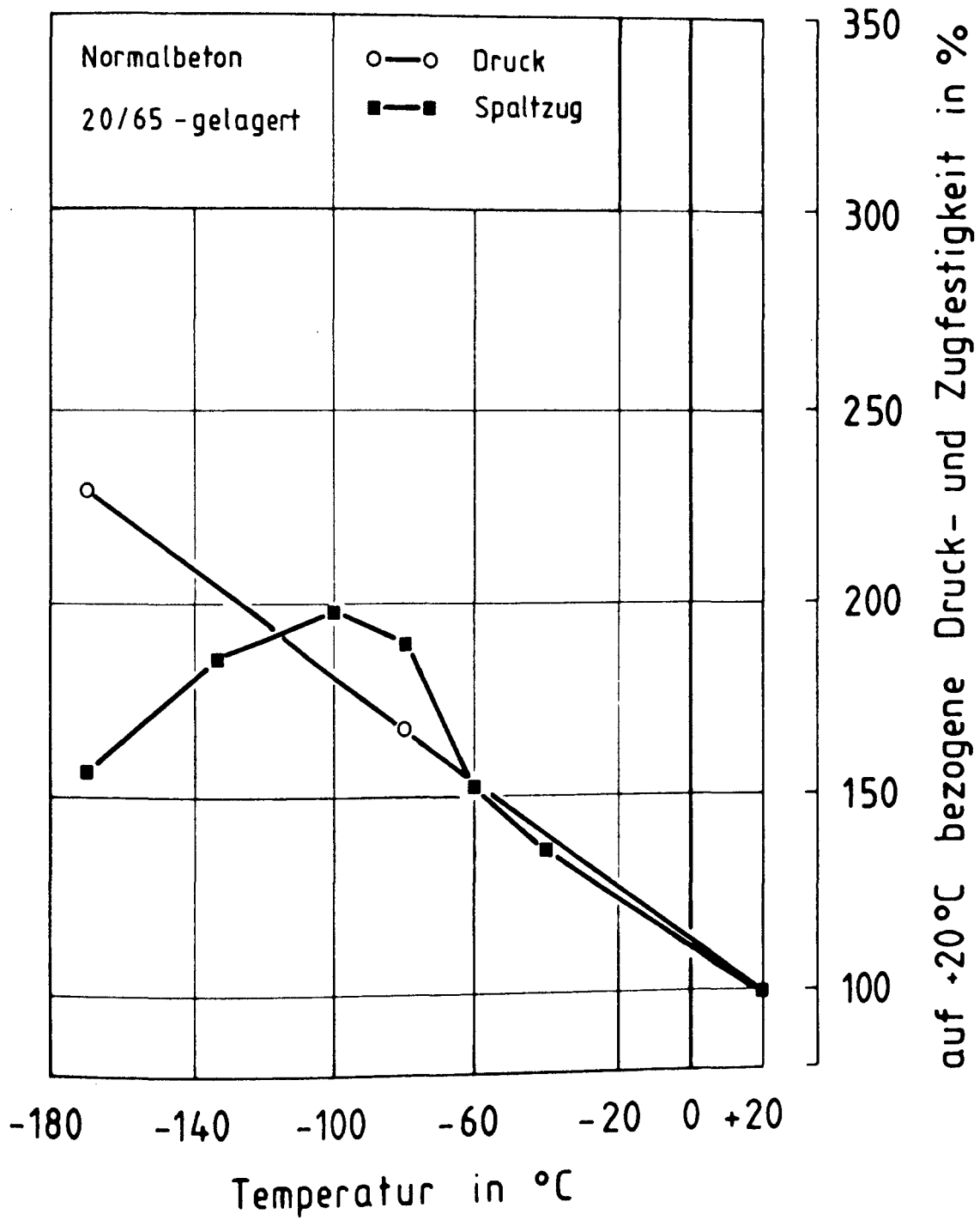


Bild 6.21

Relative Druck- und Zugfestigkeit von klimagelagertem Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

Leichtbeton

Bild 6.22 zeigt die Werte der zentrischen und der Spaltzugfestigkeit für den foliengelagerten Leichtbeton. Die Werte der zentrischen Zugfestigkeit liegen im gesamten Temperaturbereich im Streuband der Spaltzugfestigkeit. Im Hinblick auf eine rechnerische Beschreibung der Zugfestigkeit im Tieftemperaturbereich kann beim foliengelagerten Leichtbeton die zentrische Zugfestigkeit und die Spaltzugfestigkeit gleichgesetzt werden.

Bild 6.23 zeigt die relativen, auf $+20^{\circ}\text{C}$ bezogenen Festigkeitswerte für den foliengelagerten Leichtbeton. Im Vergleich zum Normalbeton (Bild 6.20) wird der geringere Einfluß der Temperatur auf die Festigkeitswerte deutlich. Die Werte der zentrischen Zugfestigkeit liegen hier über denen der Spaltzugfestigkeit, beziehen sich aber auf geringere Raumtemperaturwerte. Die Kurven für die Zugfestigkeitswerte zeigen bis -40°C einen ansteigenden Verlauf. Bei niedrigeren Temperaturen bleiben die Werte konstant bzw. fallen leicht ab. Die Kurve für die Druckfestigkeit zeigt bei Temperaturen unter -80°C konstante Werte. Ein abfallender Ast, wie bei dem Normalbeton, tritt nicht auf.

Bild 6.24 zeigt die relativen, auf $+20^{\circ}\text{C}$ bezogenen Festigkeitswerte für den normalklimagelagerten Leichtbeton. Der Vergleich mit Bild 6.23 zeigt den Einfluß der Lagerungsbedingungen. Die Spaltzugfestigkeit von normalklimagelagertem Leichtbeton ist im Tieftemperaturbereich gegenüber Raumtemperatur nahezu konstant.

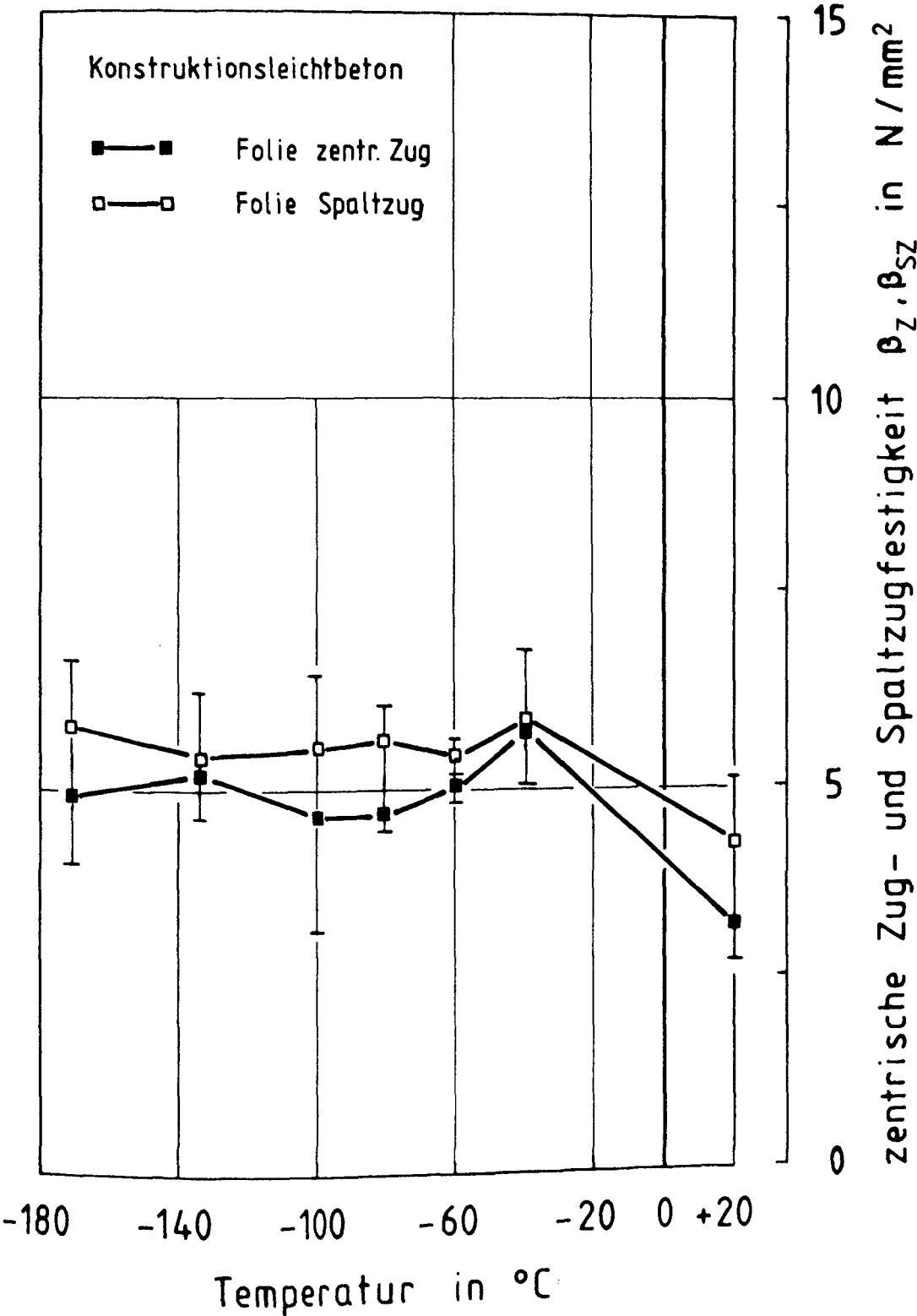


Bild 6.22

Zentrische Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

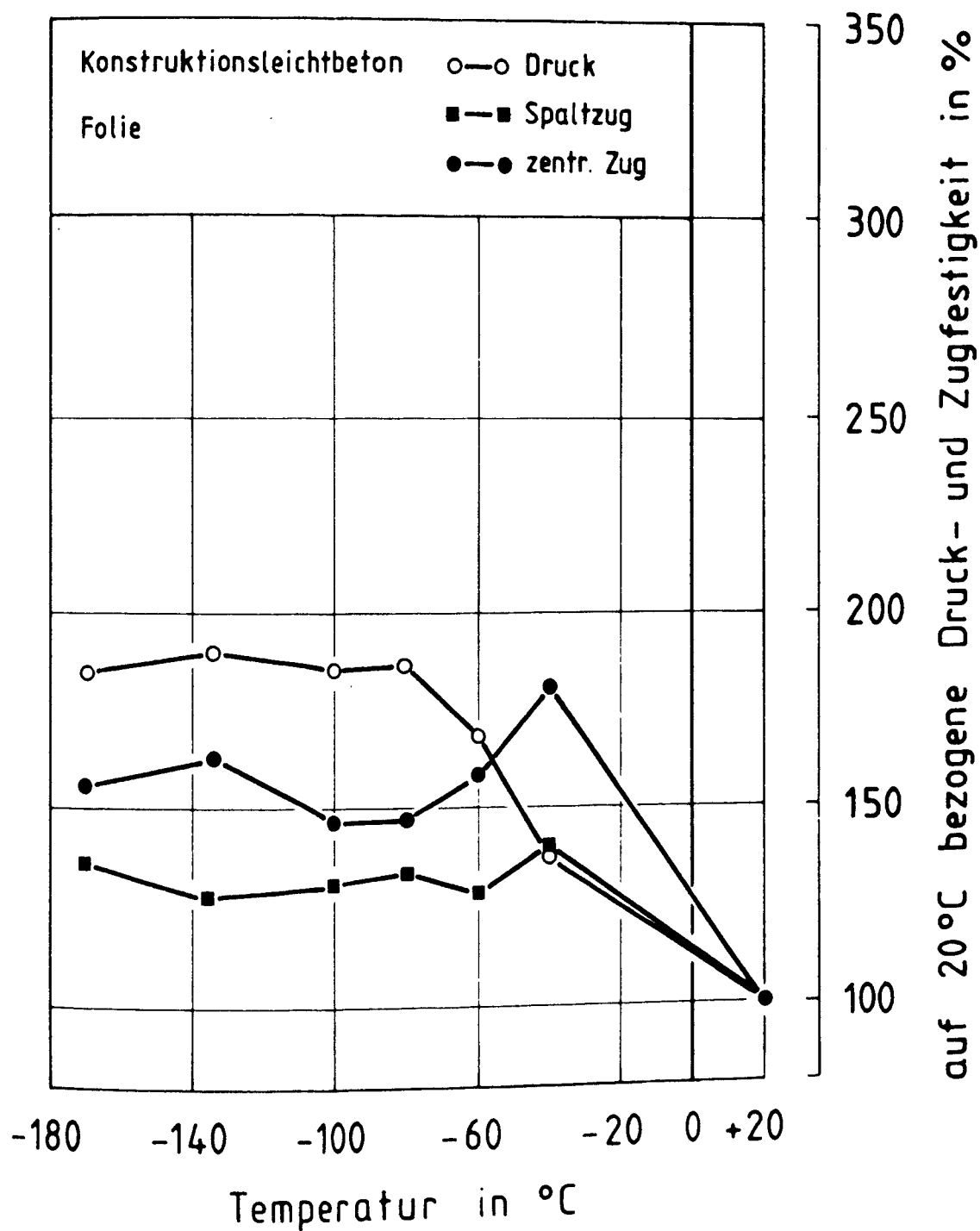


Bild 6.23

Relative Druck- und Zugfestigkeit von foliengelagertem Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

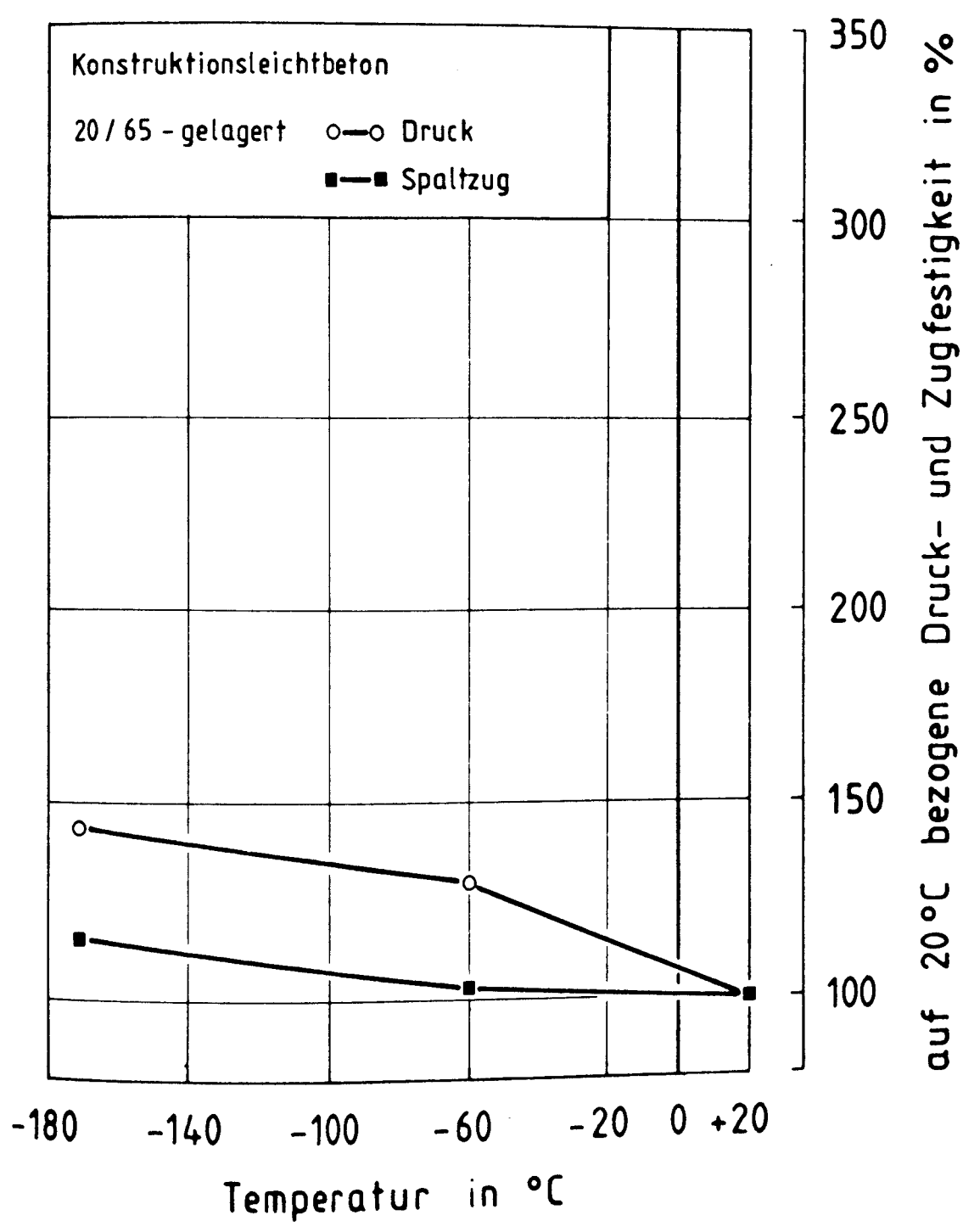


Bild 6.24 Relative Druck- und Zugfestigkeit von klimagelagertem
Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Versuchsergebnisse

7 VERSUCHSAUSWERTUNG

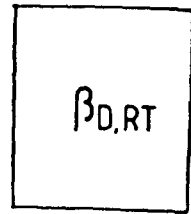
7.1 Vorbemerkungen

Die Eigenschaften von Normal- und Leichtbeton bei tiefen Temperaturen sind in mehreren Forschungsvorhaben der Autoren untersucht worden / 1 bis 16 /. Das Ziel besteht darin, Rechenansätze zu liefern, mit denen eine sichere Abschätzung der Tieftemperatureigenschaften möglich ist. Hierbei wurde auf die einfache Handhabung der Rechenansätze besonderer Wert gelegt, weshalb nur der Parameter "mittlerer Feuchtegehalt u_m " in die Rechenansätze mitaufgenommen wurde. Wie alle Rechenansätze gelten die in den folgenden Abschnitten zusammengestellten Rechenansätze streng genommen nur für die untersuchten Betone. Bei Anwendung der Rechenansätze auf andere Mischungen ist infolge der geringen Anzahl der berücksichtigten Parameter mit Abweichungen zu rechnen.

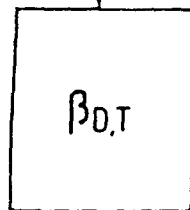
Zur Beschreibung der Druckfestigkeit von Beton im Tieftemperaturbereich wird in Übereinstimmung mit anderen Forschern / 25, 26 / ein additiver Ansatz gewählt. Hierbei ist der Festigkeitszuwachs bei Normalbeton abhängig von der mittleren Feuchte und unabhängig von der Betonfestigkeit bei Raumtemperatur. Bei Leichtbeton ist kein einheitlicher Einfluß der mittleren Feuchte auf die Druckfestigkeit bei Tieftemperatur vorhanden. Die Form des additiven Ansatzes wird auch für die Beschreibung der Druckbruchdehnung und des Druck-E-Moduls angewandt.

Zur Beschreibung der Zugfestigkeit von Beton im Tieftemperaturbereich stehen zwei Wege zur Verfügung (siehe Bild 7.1). Ausgehend von der Druckfestigkeit bei Raumtemperatur kann zunächst die Beschreibung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur mit oben erwähnten Ansätzen erfolgen. Anschließend wird mit bekannten oder ermittelten Faktoren nach CEB/FIP aus der Druckfestigkeit die zugehörige Zugfestigkeit berechnet. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in der großen Anzahl der als Basis für die Ermittlung dienenden Ergebnisse. Folgende Gesichtspunkte sind bei diesem Vorgehen jedoch zu beachten. Die CEB-FIP-Faktoren geben einen Zusammenhang zwischen zwei Festigkeitswerten für alle Betongüten an. Bei Anwendung dieser Darstellung zur Beschreibung der Tieftemperatureigenschaften wird vorausgesetzt, daß der Einfluß der sinkenden Temperatur qualitativ ähnlich ist dem Einfluß einer höheren Betondruckfestigkeit. Dies ist nur dann der Fall, wenn die Kurven für die Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit einander ähnlich sind und im gesamten Temperaturbereich positive Steigungen aufweisen. Weiterhin ist zu beachten, daß im Tief

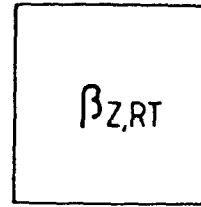
Versuchsergebnis



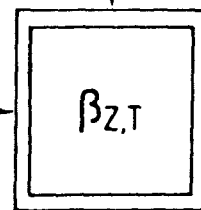
$$\beta_{D,T} = \beta_{D,RT} + \Delta \beta_{D(T)}$$



Versuchsergebnis



$$\beta_{Z,T} = \beta_{Z,RT} + \Delta \beta_{Z(T)}$$



$$\beta_{Z,T} = c \cdot \beta_{D,T}^{2/3}$$

Bild 7.1

Mögliche Wege zur Beschreibung der Zugfestigkeit von Beton bei tiefen Temperaturen

temperaturbereich Druckfestigkeitswerte bis 150 N/mm^2 gemessen werden. Dies bedingt eine große, mögliche Streubreite der Zugfestigkeit zwischen den angegebenen Fraktilenwerten, die durch die möglichen Streuungen im Rechenansatz für die Druckfestigkeit noch erhöht wird. Dennoch haben frühere Forschungsvorhaben gezeigt, daß mit diesem Vorgehen gute Abschätzungen möglich sind.

Die andere Möglichkeit zur Beschreibung der Zugfestigkeit bei tiefen Temperaturen besteht darin, ausgehend von der Zugfestigkeit bei Raumtemperatur einen direkten additiven Rechenansatz für die Zugfestigkeit bei tiefen Temperaturen zu bestimmen. Der Raumtemperaturwert kann dann durch Versuch bestimmt werden, womit Streuungen zwischen verschiedenen Betonzusammensetzungen vermieden werden. Ist die Bestimmung der Zugfestigkeit bei Raumtemperatur durch Versuch nicht möglich, so muß die Zugfestigkeit aus der Druckfestigkeit bei Raumtemperatur mit Hilfe der bekannten CEB-FIP-Faktoren unter Berücksichtigung der Versuchskörperabmessungen berechnet werden.

Direkte Ansätze für die Spaltzugfestigkeit, die nicht auf die Druckfestigkeit zurückgreifen, sind derzeit nicht bekannt. Im Abschnitt 7.3.2 werden Rechenansätze hierzu vorgeschlagen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der zu erwartenden geringeren Streuung der Ergebnisse. Als Nachteil ist die geringe Anzahl der in den bisherigen Forschungsarbeiten untersuchten Betonparameter anzusehen. Aus diesem Grund ist auch die Angabe eines direkten Rechenansatzes für die zentrische Zugfestigkeit nicht sinnvoll. Daher wird für die zentrische Zugfestigkeit ein auf der Spaltzugfestigkeit basierender Rechenansatz angegeben.

Für den Zug-E-Modul und die Zugbruchdehnung wird ein additiver Rechenansatz auf Basis des Rechenansatzes der entsprechenden Druckeigenschaften gewählt.

Die Anlagen 1 und 2 enthalten in zusammengefaßter und für die Berechnung aufbereiteter Form alle im Abschnitt 7 verwendeten Ansätze.

7.2 Beschreibung der Festigkeit und der Verformung von druckbeanspruchtem Beton

7.2.1 Druckfestigkeit

Normalbeton

Für die Berechnung der Druckfestigkeit von Normalbeton im Tieftemperaturbereich wurde in /1/ der folgende Rechenansatz ermittelt (Gleichung 7.1):

$$\beta_{C,T} = \beta_{C,RT} + u_m \left[1 - \left(\frac{T+170}{190} \right)^2 \right]$$

Basis hierfür waren Versuche an PZ-Betonen B25 und B45 mit Wasserzementwerten von 0,8 und 0,6 nach Lagerung unter Wasser, in Folie und in 20/65-Klima.

Es wurde festgestellt, daß die Festigkeitsentwicklung von der Lagerungsbedingung bestimmt wird und von der Betondruckfestigkeit bei Raumtemperatur unabhängig ist. Der gewählte additive Ansatz enthält daher die mittlere Feuchte als Maß für das im Beton enthaltene Wasser.

Bild 7.2 zeigt die Versuchsergebnisse des hier untersuchten Normalbetons und die gerechneten Werte nach Gleichung 7.1. Man erkennt, daß die Festigkeitssteigerung der foliengelagerten Versuchskörper bei Temperaturen unter -100°C deutlich unterschätzt wird. Diese Erscheinung wurde für den B45 auch in /1/ festgestellt. Beim normalklimagelagerten Normalbeton ist die Anzahl der Versuchsergebnisse für eine Bewertung des Rechenansatzes zu gering.

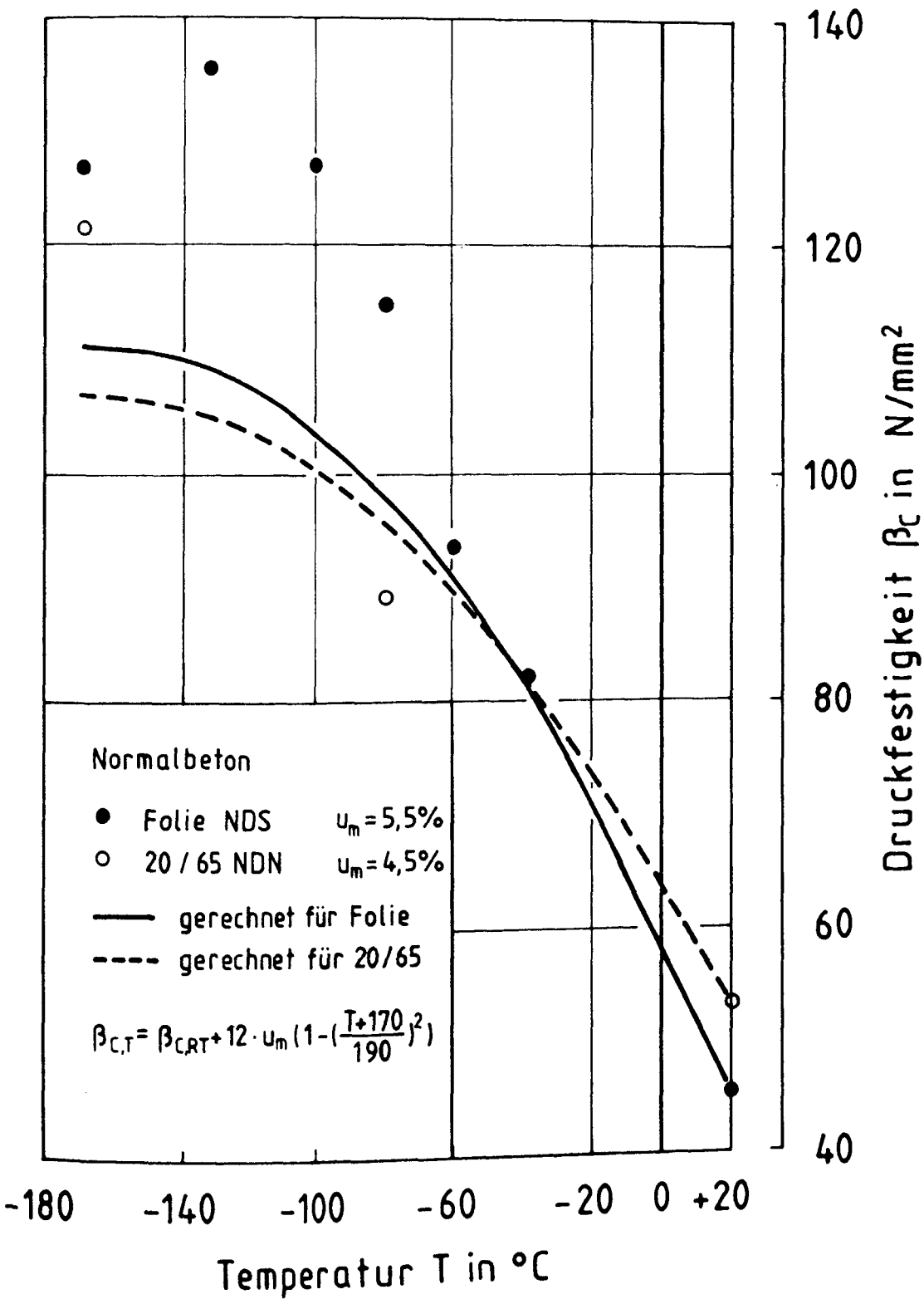


Bild 7.2 Druckfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Berechnungsergebnissen

Leichtbeton

Für die Berechnung der Druckfestigkeit von Leichtbeton im Tieftemperaturbereich wurde in /7/ der folgende Rechenansatz ermittelt (Gleichung 7.2):

$$\beta_{C,T} = \beta_{C,RT} + 45 \left[1 - \left(\frac{T+170}{190} \right)^2 \right]$$

Basis hierfür waren Versuche mit Leichtbetonen LB45 mit Gesamtzugabewassermengen von 220 - 300 kg/m³ (ofentrockene bzw. vorgefeuchtete Zuschläge), Zementgehalten von 350 - 450 kg/m³ und nach Lagerung in Folie und in 20/65-Klima. Es wurde kein eindeutiger Einfluß der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung festgestellt.

Bild 7.3 zeigt die Versuchsergebnisse des hier untersuchten Leichtbetons und die gerechneten Werte nach Gleichung 7.2 für den foliengelagerten Leichtbeton. Die Festigkeitsentwicklung des foliengelagerten Leichtbetons wird durch den Rechenansatz gut beschrieben. Die Festigkeitsentwicklung des normalklimagelagerten Leichtbetons kann mit dem Rechenansatz nicht zufriedenstellend angenähert werden. Da der Festigkeitswert bei Raumtemperatur für Normalklimalagerung höher ist als bei Folienlagerung und im Rechenansatz die Versuchskörperfeuchte nicht berücksichtigt wird, liegt die rechnerische Festigkeitsentwicklung des normalklimagelagerten Leichtbetons oberhalb der des foliengelagerten Leichtbetons.

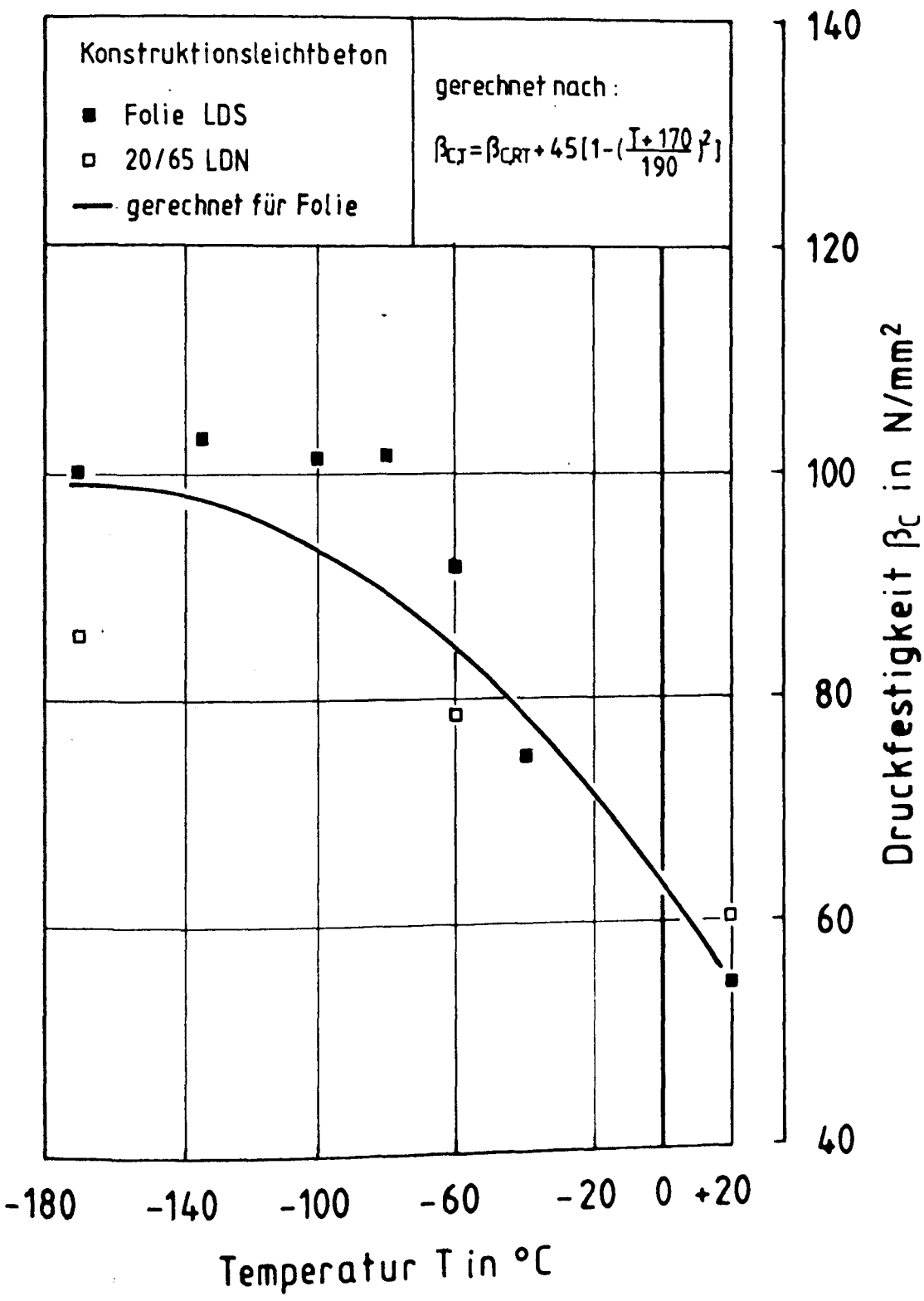


Bild 7.3 Druckfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.2.2 Druckbruchdehnung

Normalbeton

Anhand der in 7.2.1 beschriebenen Versuche wurde für die dort untersuchten Betone der folgende Rechenansatz für die Druckbruchdehnung von Normalbeton ermittelt (Gleichung 7.3)

$$-80^{\circ}\text{C} \leq T \leq +20^{\circ}\text{C} \quad \epsilon_{D,T} = \epsilon_{D,RT} - \left[1 - \left(\frac{T+80}{100}\right)^2\right] \cdot \frac{u_m}{5}$$

$$-170^{\circ}\text{C} \leq T \leq -80^{\circ}\text{C} \quad \epsilon_{D,T} = \epsilon_{D,RT} - \frac{T+170}{90} \cdot \frac{u_m}{5}$$

Der Rechenansatz nach /1/ weist ein ausgeprägtes Maximum bei -80°C für alle Feuchtegehalte auf, mit quadratischem Anstieg bis -80°C und einem linearen Abfall der Bruchdehnung bei Temperaturen unter -80°C . Bild 7.4 zeigt die Versuchsergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens und die gerechneten Werte nach Gleichung 7.3. Eine Überprüfung des Ansatzes mit Hilfe der Versuchsergebnisse ist nicht möglich, da die Druckbruchdehnung nur bei $+20^{\circ}\text{C}$ und bei -170°C ermittelt wurde.

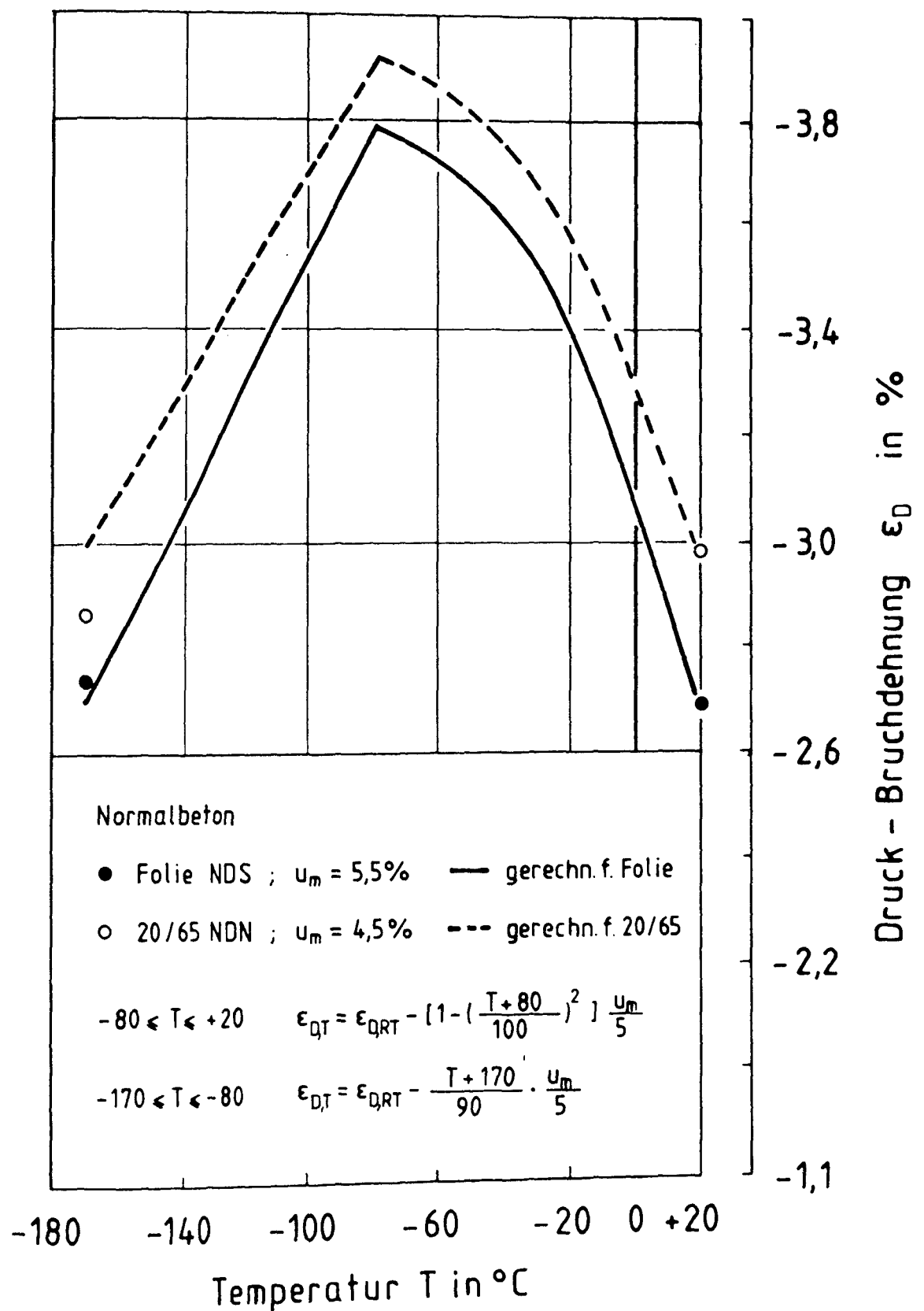


Bild 7.4

Druckbruchdehnung von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

Leichtbeton

In /6/ wurde für die dort untersuchten Betone der folgende Rechenansatz für die Druckbruchdehnung von Leichtbeton ermittelt (Gleichung 7.4).

$$\begin{aligned}
 -60^{\circ}\text{C} \leq T \leq +20^{\circ}\text{C} \quad & \epsilon_{D,T} = \epsilon_{D,RT} - 1,5 \left[1 - \left(\frac{T+60}{80} \right) \right] \\
 -170^{\circ}\text{C} \leq T \leq -60^{\circ}\text{C} \quad & \epsilon_{D,T} = \epsilon_{D,RT} + \left[0,2 - 1,7 \left(\frac{T+170}{110} \right)^2 \right]
 \end{aligned}$$

Der Rechenansatz weist ein ausgeprägtes Maximum bei -60°C auf. Im Gegensatz zum Normalbeton ist der Anstieg der Druckbruchdehnung unabhängig von dem Feuchtegehalt. Die gerechneten Werte weisen bis -60°C einen linearen Anstieg auf und bei weiter sinkenden Temperaturen einen parabolischen Abfall auf. Bild 7.5 zeigt die vorliegenden Versuchsergebnisse und die gerechneten Werte nach Gleichung 7.4. Auch hier ist die Kontrolle des Rechenansatzes wegen der geringen Anzahl der untersuchten Temperaturstufen nicht möglich.

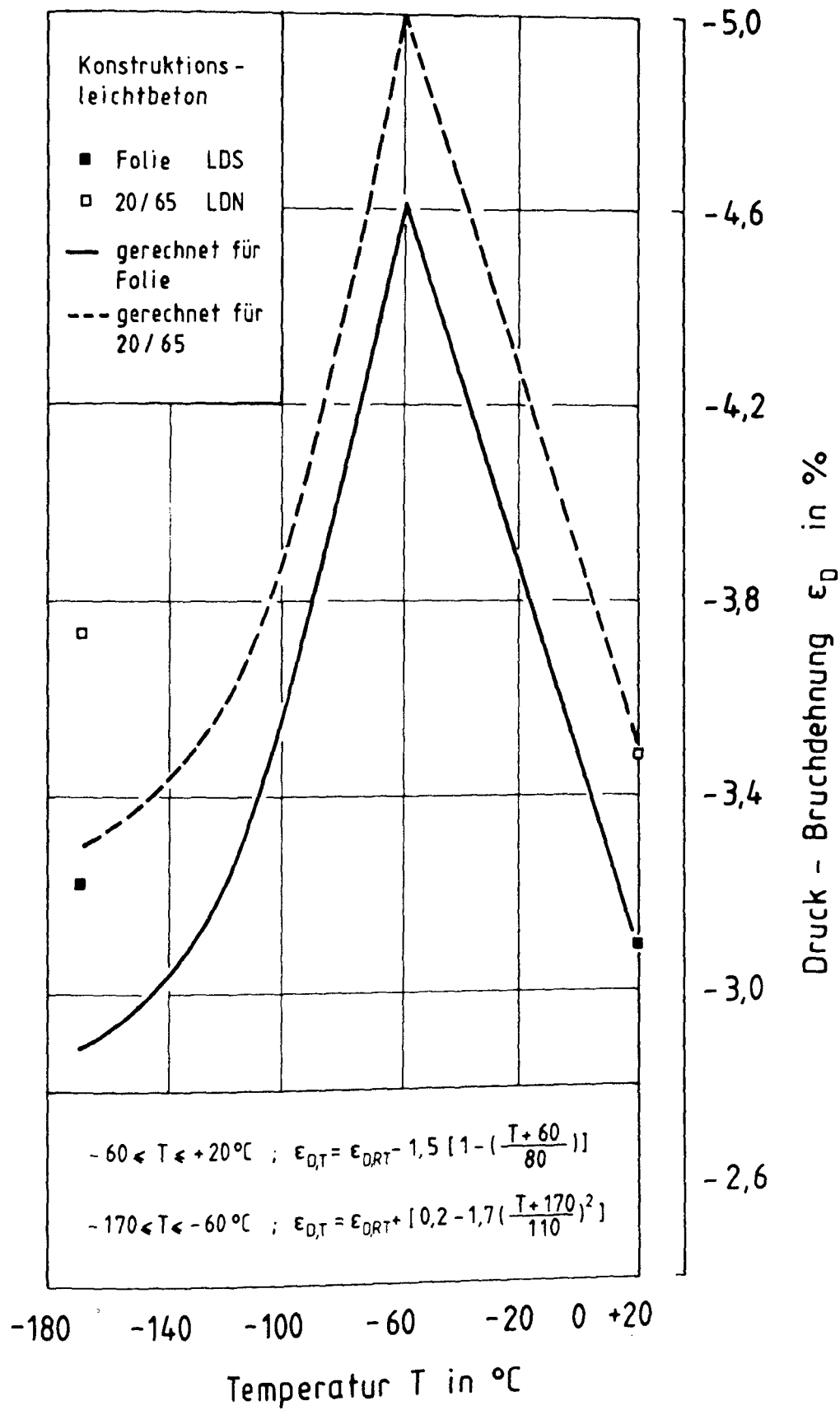


Bild 7.5

Druckbruchdehnung von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.2.3 Druck-E-Modul

Normalbeton

Für die Beschreibung des Druck-E-Moduls von Normalbeton bei tiefen Temperaturen wurde in /1/ der folgende Rechenansatz ermittelt (Gleichung 7.5).

$$E_{D,T} = E_{D,RT} + 4 u_m \frac{20-T}{190}$$

Bild 7.6 zeigt die Versuchsergebnisse und die gerechneten Werte nach /1/. Gleichung 7.5 beschreibt einen linearen, feuchteabhängigen Anstieg des Druck-E-Moduls. Eine weitere Beurteilung des Rechenansatzes ist wegen der geringen Anzahl an Versuchsergebnissen nicht möglich.

Leichtbeton

In /6/ wurde für die temperaturabhängige Entwicklung des Druck-E-Moduls von Leichtbeton der folgende Rechenansatz vorgeschlagen (Gleichung 7.6).

$$E_{D,T} = E_{D,RT} + 13,3 \left(1 - \sqrt{\frac{T+170}{190}} \right)$$

Bild 7.7 zeigt den quadratischen, feuchteunabhängigen Verlauf der nach Gleichung 7.6 gerechneten Werte und die Versuchsergebnisse. Auch hier ist ein genauerer Vergleich zwischen Rechnung und Versuchsergebnissen nicht möglich.

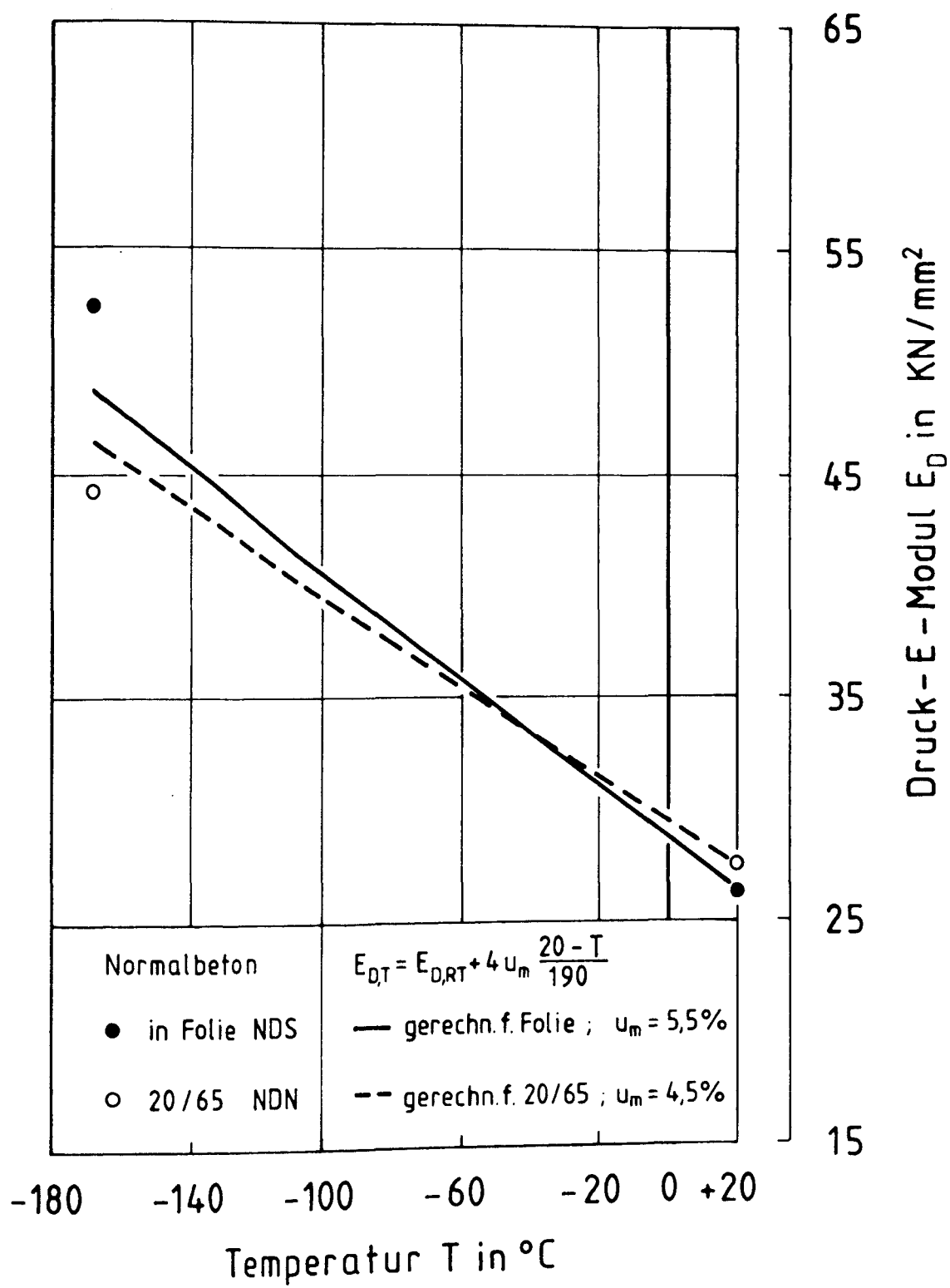


Bild 7.6 Druck-E-Modul von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

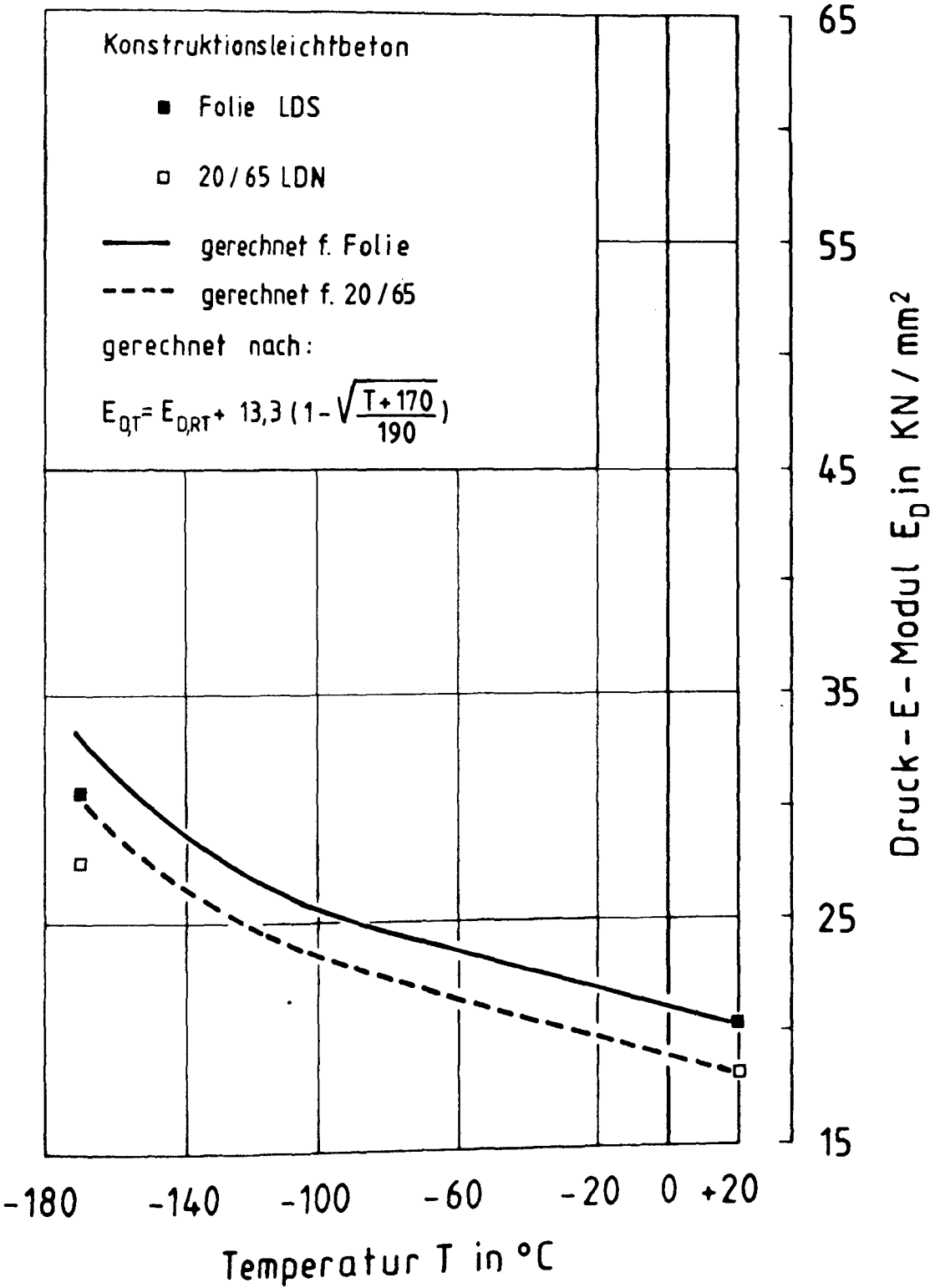


Bild 7.7

Druck-E-Modul von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.3 Beschreibung der Festigkeit von zugbeanspruchtem Beton durch Faktoren nach dem CEB-FIP Model Code

7.3.1. Spaltzugfestigkeit

Normalbeton

Für das in Abschnitt 7.2.1 beschriebene Versuchsprogramm ist in /1/ der Zusammenhang zwischen der Druck- und der Spaltzugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen mit der folgenden Gleichung 7.7 angegeben worden.

$$\beta_{SZ,T} = \frac{0,30}{0,56} \cdot 0,43 \cdot \beta_{C,T}^{2/3}$$

mit $\beta_{C,T}$ nach Glg. 7.1

In Bild 7.8 ist dieser Zusammenhang durch die Mittelwertlinie und die 5 % bzw. 95 %-Fraktilen angegeben. Außerdem sind die in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Versuchsergebnisse eingezeichnet. Die Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und dem Rechenansatz ist gut. Die Versuchsergebnisse für die foliengelagerten Probekörper liegen im oberen Streubereich, die Ergebnisse der normalklimagelagerten Probekörper liegen im unteren Streubereich.

Bild 7.9 zeigt die Ergebnisse der Spaltzugversuche und die aus Gleichung 7.1 und 7.7 ermittelten Rechenwerte. Eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung ist nur bei Ansatz des oberen Fraktilenwertes ($c = 0,56$) für die foliengelagerten Versuchskörper und des unteren Fraktilenwertes ($c = 0,30$) für die normalklimagelagerten Versuchskörper möglich. Die Übereinstimmung für den Mittelwert ($c = 0,43$) ist nicht befriedigend. Der abfallende Ast der Spaltzugkurven ist mit der gewählten Form des rechnerischen Ansatzes nicht darstellbar.

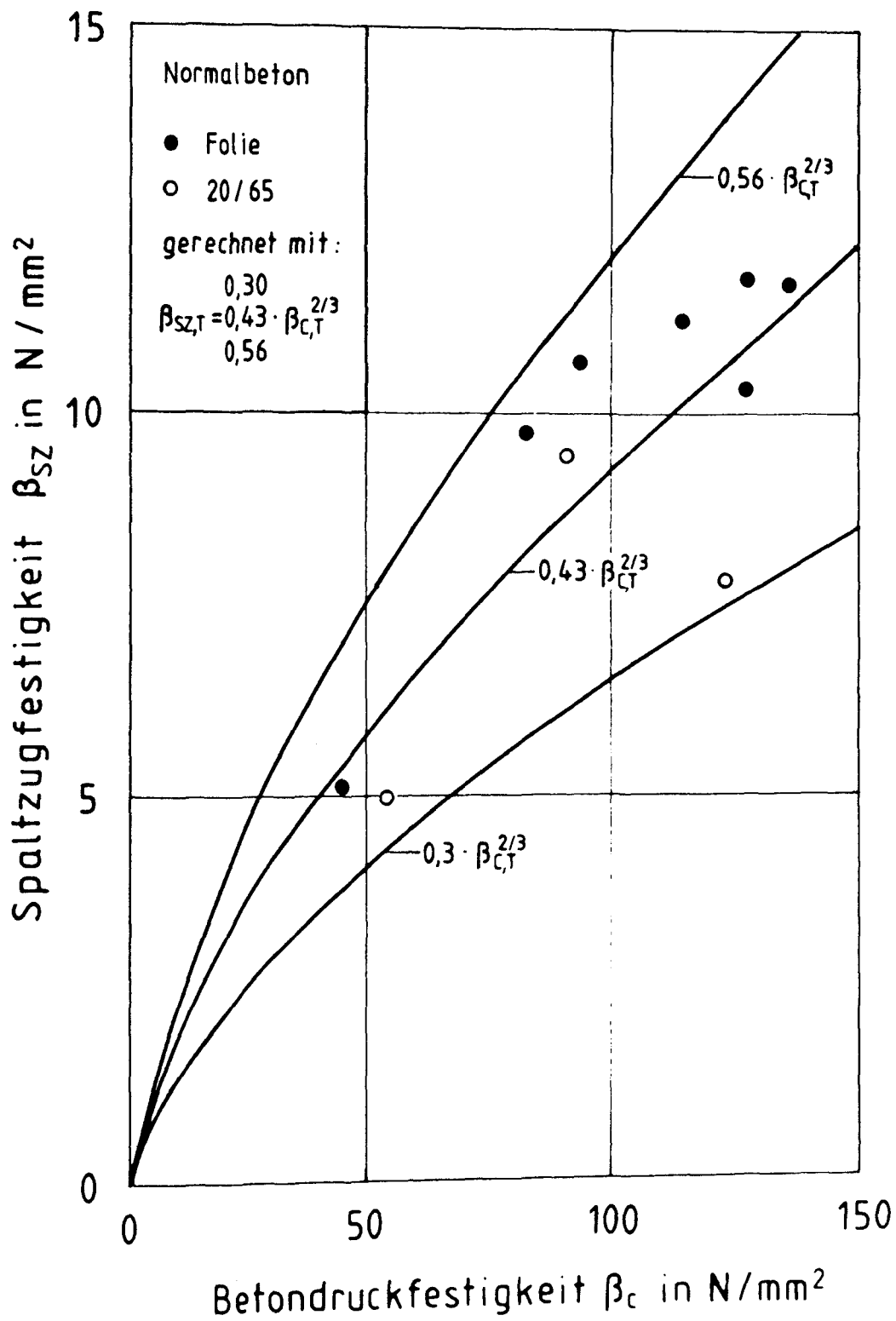


Bild 7.8 Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen

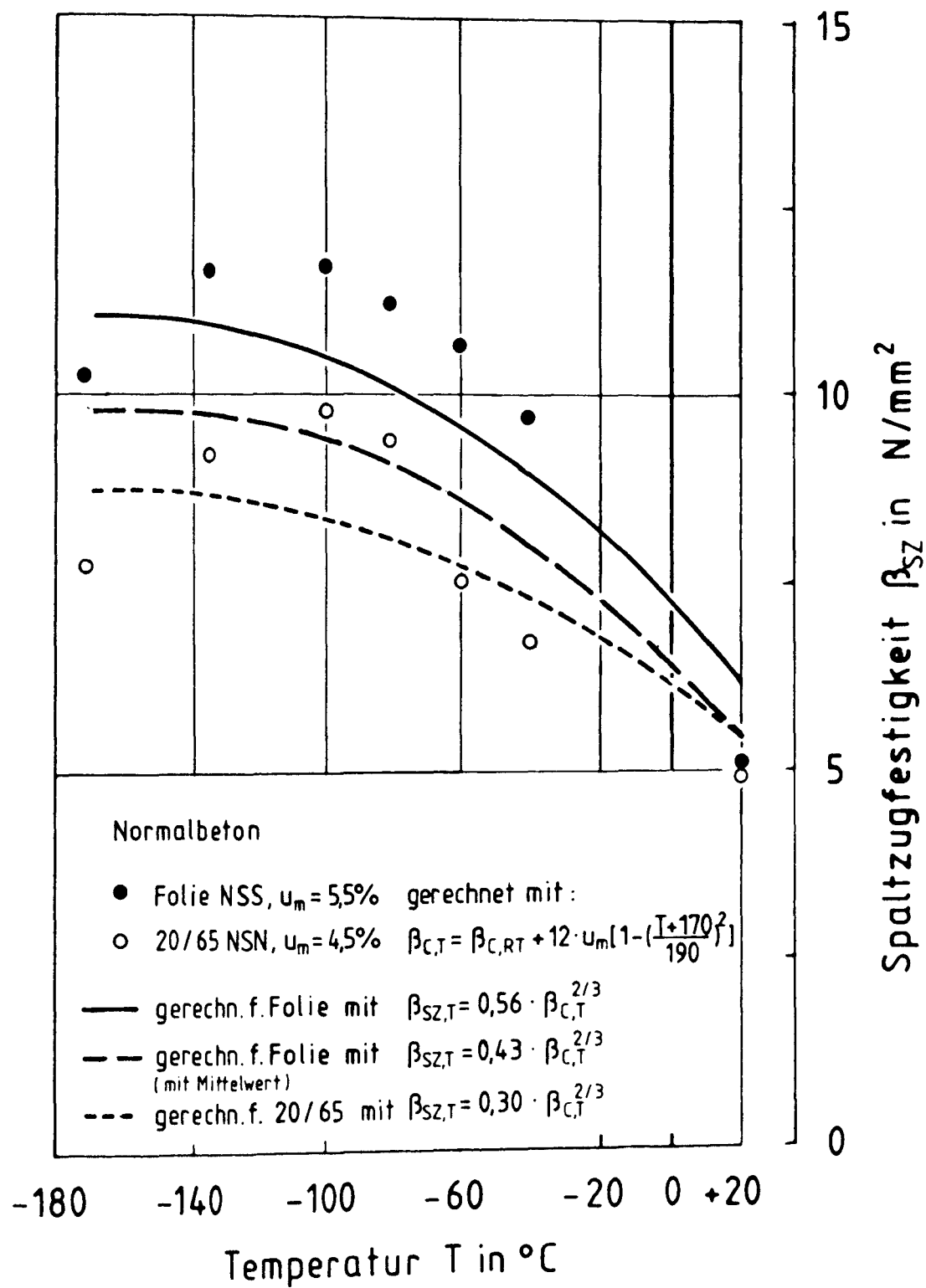


Bild 7.9

Spaltzugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

Leichtbeton

In /6/ ist für das in Abschnitt 7.2.1 beschriebene Versuchsprogramm der Zusammenhang zwischen der Druck- und der Spaltzugfestigkeit für Leichtbeton mit der Gleichung 7.8 beschrieben worden.

$$\beta_{SZ,T} = \frac{0,20}{0,32} \cdot \beta_{C,T}^{2/3}$$

mit $\beta_{C,T}$ nach Glg.7.2

Bild 7.10 zeigt die Mittelwertkurve und die 5%-Fraktilen nach Gleichung 7.8 und die Versuchsergebnisse. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung ist gut. Die Versuchsergebnisse für die foliengelagerten Versuchskörper liegen im oberen Streubereich, die Versuchsergebnisse der normalklimagelagerten Versuchskörper im unteren. Bild 7.11 zeigt die nach Gleichung 7.2 und 7.8 berechneten Werte und die Versuchsergebnisse. Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch unter Berücksichtigung der Streuungen nach Bild 7.3 für die Druckfestigkeit befriedigend.

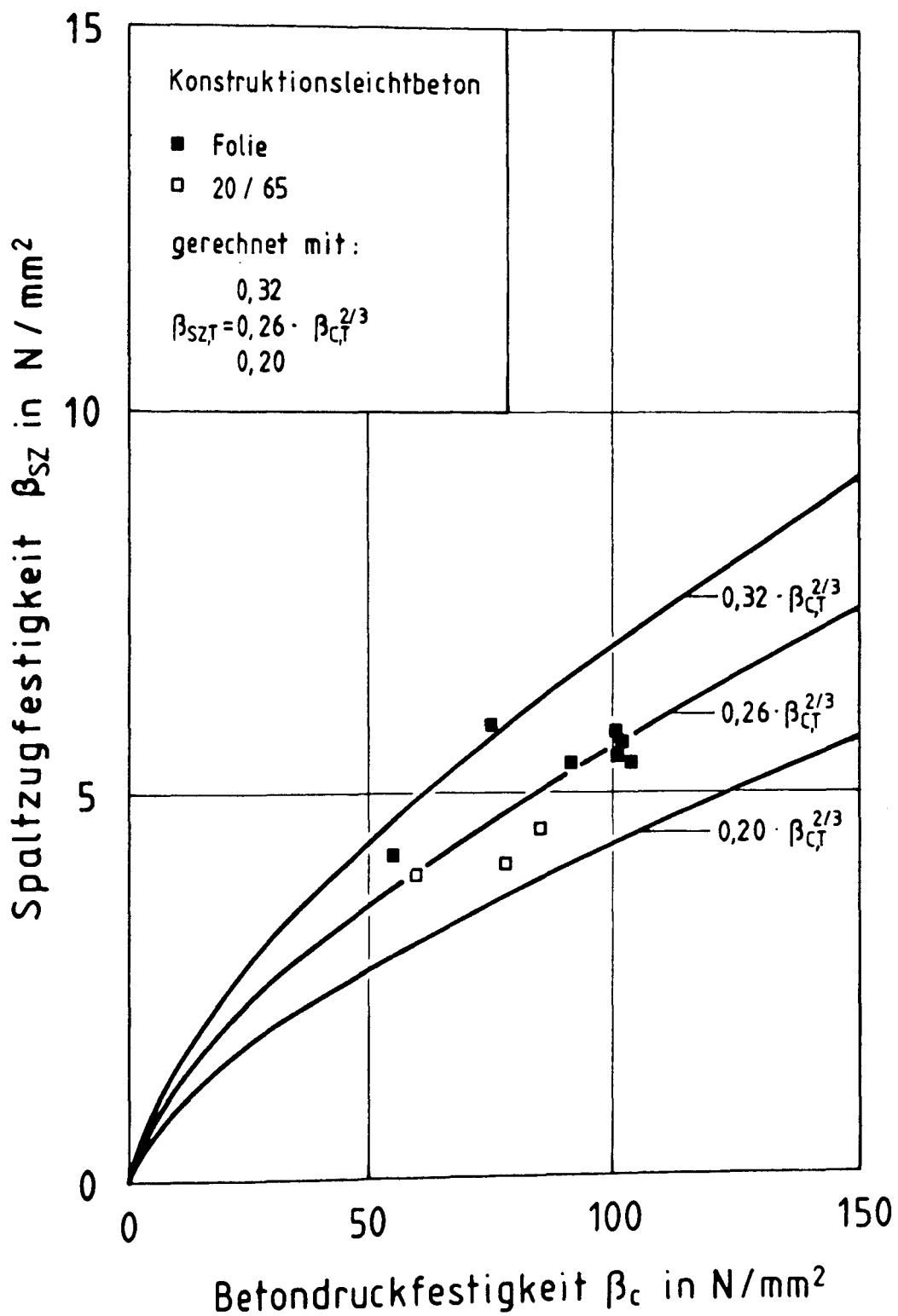


Bild 7.10

Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen

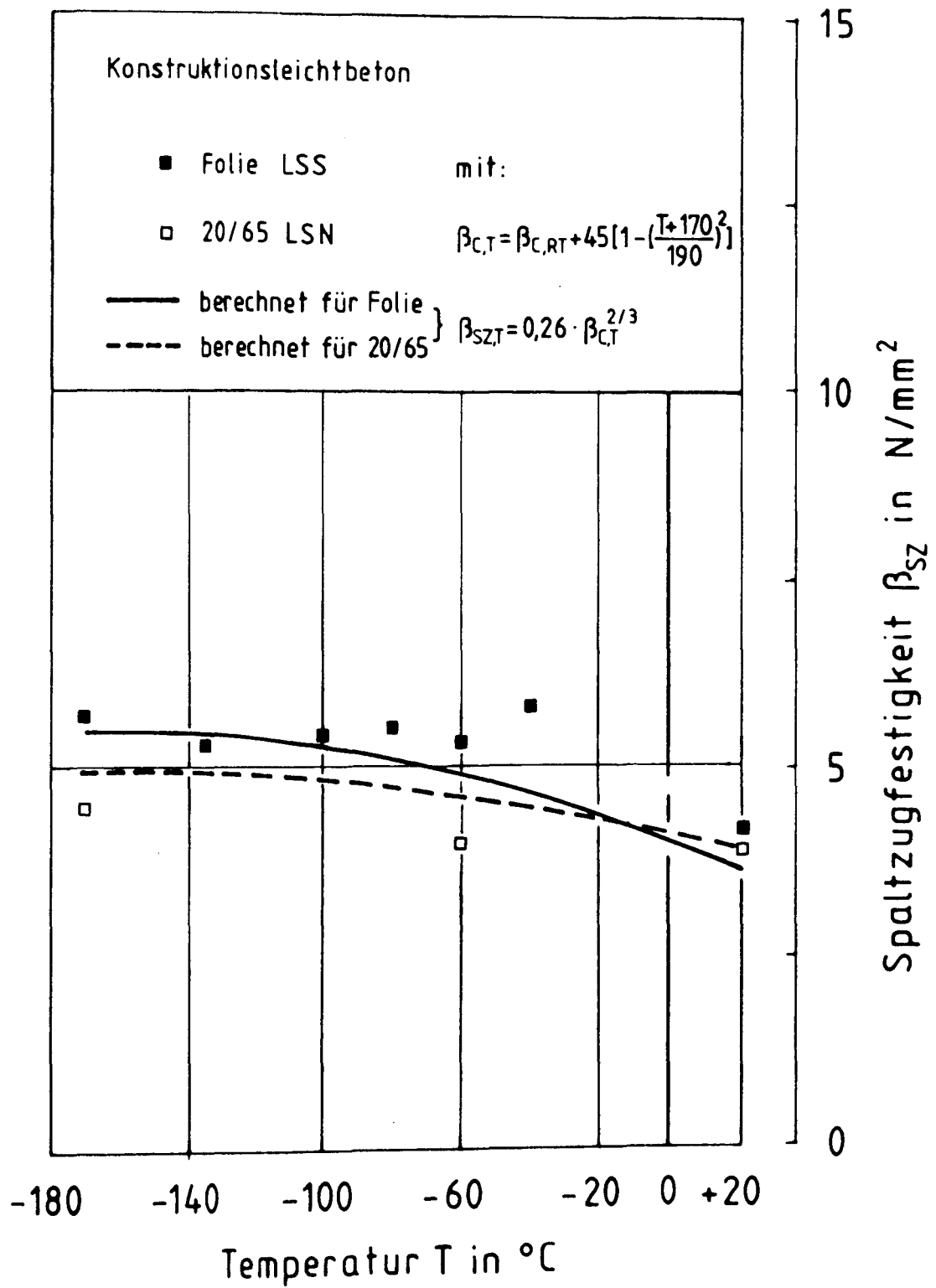


Bild 7.11

Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.3.2 Zentrische Zugfestigkeit

Normalbeton

Für den Zusammenhang zwischen der zentrischen Zugfestigkeit und der Druckfestigkeit von Normalbeton im Tieftemperaturbereich liegen bisher keine Rechenansätze vor. Von Rüsç wird in /18/ folgender Zusammenhang für Raumtemperatur genannt (Gleichung 7.9).

$$\beta_{z,T} = \frac{0,16}{0,32} \cdot \beta_{c,T}^{2/3}$$

mit $\beta_{c,T}$ nach Glg. 7.1

Der Mittelwert von $c = 0,24$ gilt für Betone aller Festigkeitsklassen, die oberen und unteren Grenzwerte gelten für die Betone B45 und B55. Bei niedrigeren Betonfestigkeitsklassen vergrößert sich das Streuband. Die Gleichung bezieht sich auf den Mittelwert der am Würfel mit 20 cm Kantenlänge in N/mm^2 ermittelten Druckfestigkeit.

Bild 7.12 zeigt den Zusammenhang zwischen der zentrischen Zugfestigkeit und der Druckfestigkeit für Normalbeton bei tiefen Temperaturen. Man erkennt, daß der Zusammenhang mit Gleichung 7.9 beschrieben werden kann. Ebenso wie bei der Spaltzugfestigkeit liegen auch hier die Ergebnisse der foliengelagerten Versuchskörper im oberen Streubereich. Eine genauere Anpassung der Mittelwertlinie an die Versuchsergebnisse erscheint aufgrund der geringen Anzahl der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht sinnvoll.

Bild 7.13 zeigt die nach Gleichung 7.1 und 7.9 ermittelten rechnerischen Werte für die zentrische Zugfestigkeit und die Versuchsergebnisse. Der Rechenansatz unterschätzt die Festigkeitsentwicklung im Tieftemperaturbereich.

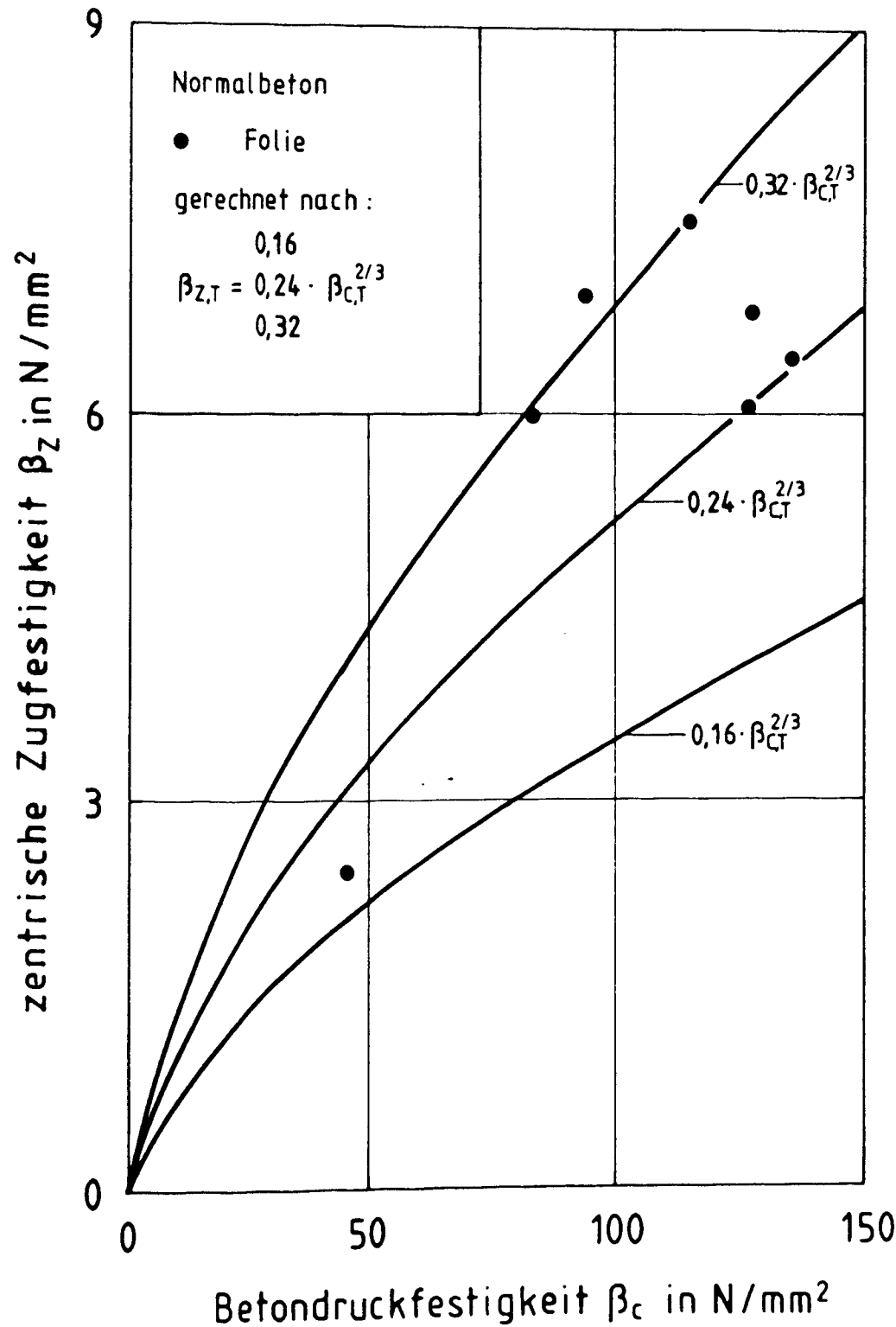


Bild 7.12 Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und
der zentrischen Zugfestigkeit von Normalbeton bei
tiefen Temperaturen

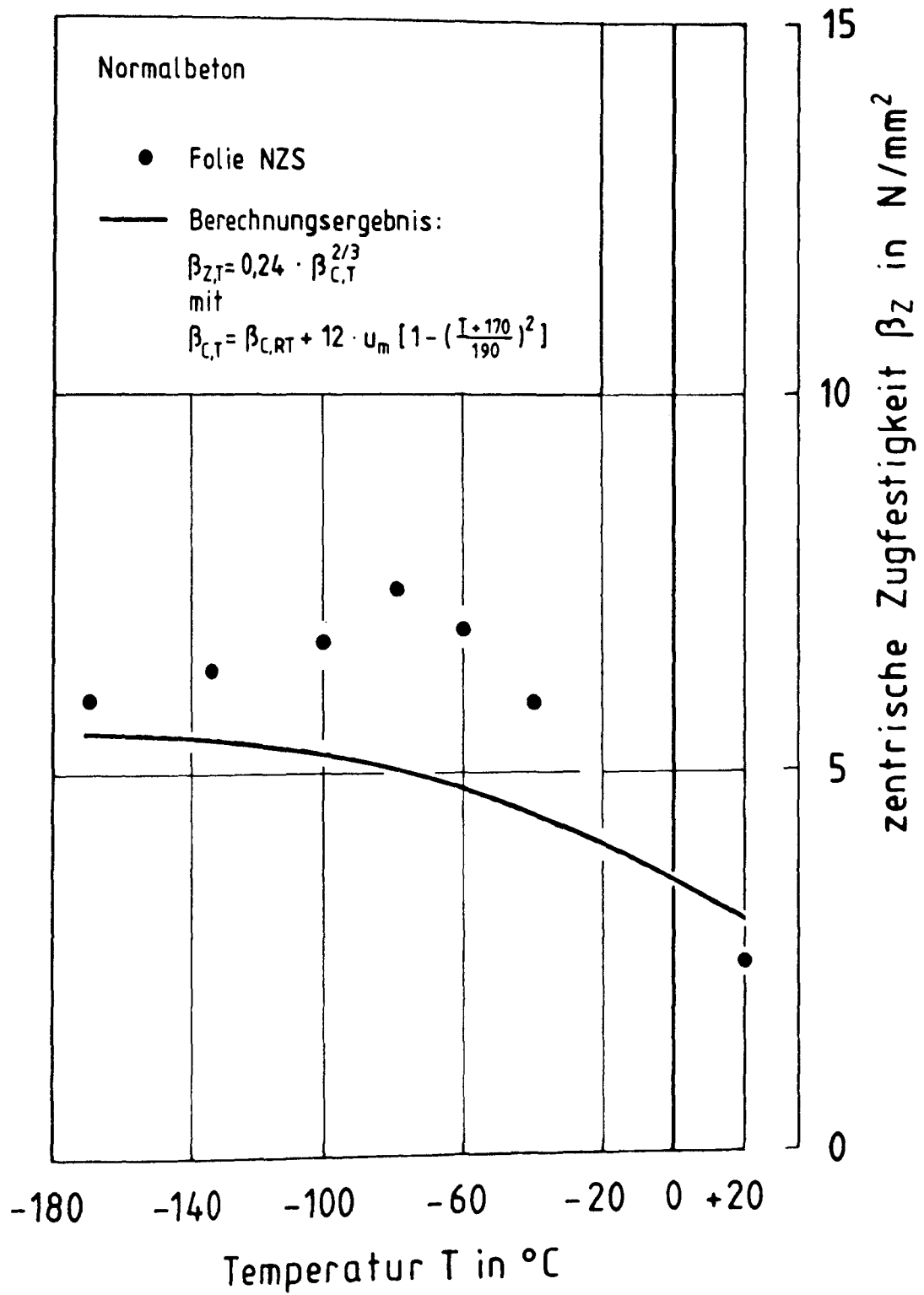


Bild 7.13

Zentrische Zugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

Leichtbeton

Für die Beschreibung des Zusammenhangs der zentrischen Zugfestigkeit und der Druckfestigkeit bei tiefen Temperaturen sind derzeit auch für Leichtbeton keine Rechenansätze bekannt. Während beim Normalbeton auf Rechenansätze zurückgegriffen werden konnte, die für Raumtemperatur entwickelt wurden, wird bei Leichtbeton ein Ansatz in Anlehnung an die Spaltzugfestigkeit vorgeschlagen. Da beim Leichtbeton die Festigkeitsentwicklung für zentrischen Zug und für Spaltzug einen ähnlichen Kurvenverlauf zeigt und die Festigkeitswerte im gesamten Temperaturbereich um maximal 1 N/mm^2 voneinander abweichen (siehe Bild 6.22), wird für die Beschreibung der Abhängigkeit der zentrischen Zugfestigkeit von der Druckfestigkeit (Gleichung 7.10) der Ansatz für die Spaltzugfestigkeit (Gleichung 7.8) übernommen.

$$\beta_{\text{SZ,T}} = \beta_{\text{Z,T}} = \frac{0,20}{0,32} \cdot \beta_{\text{C,T}}^{2/3}$$

mit $\beta_{\text{C,T}}$ nach Glg. 7.2

Bild 7.14 zeigt den Rechenansatz nach Gleichung 7.10 und die Versuchsergebnisse. Die Gleichung 7.10 ist geeignet, den Zusammenhang zwischen der zentrischen Zugfestigkeit und der Druckfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen zu beschreiben. Bild 7.15 zeigt die nach Gleichung 7.2 und 7.10 ermittelten rechnerischen Werte der zentrischen Zugfestigkeit und die Versuchsergebnisse. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist befriedigend.

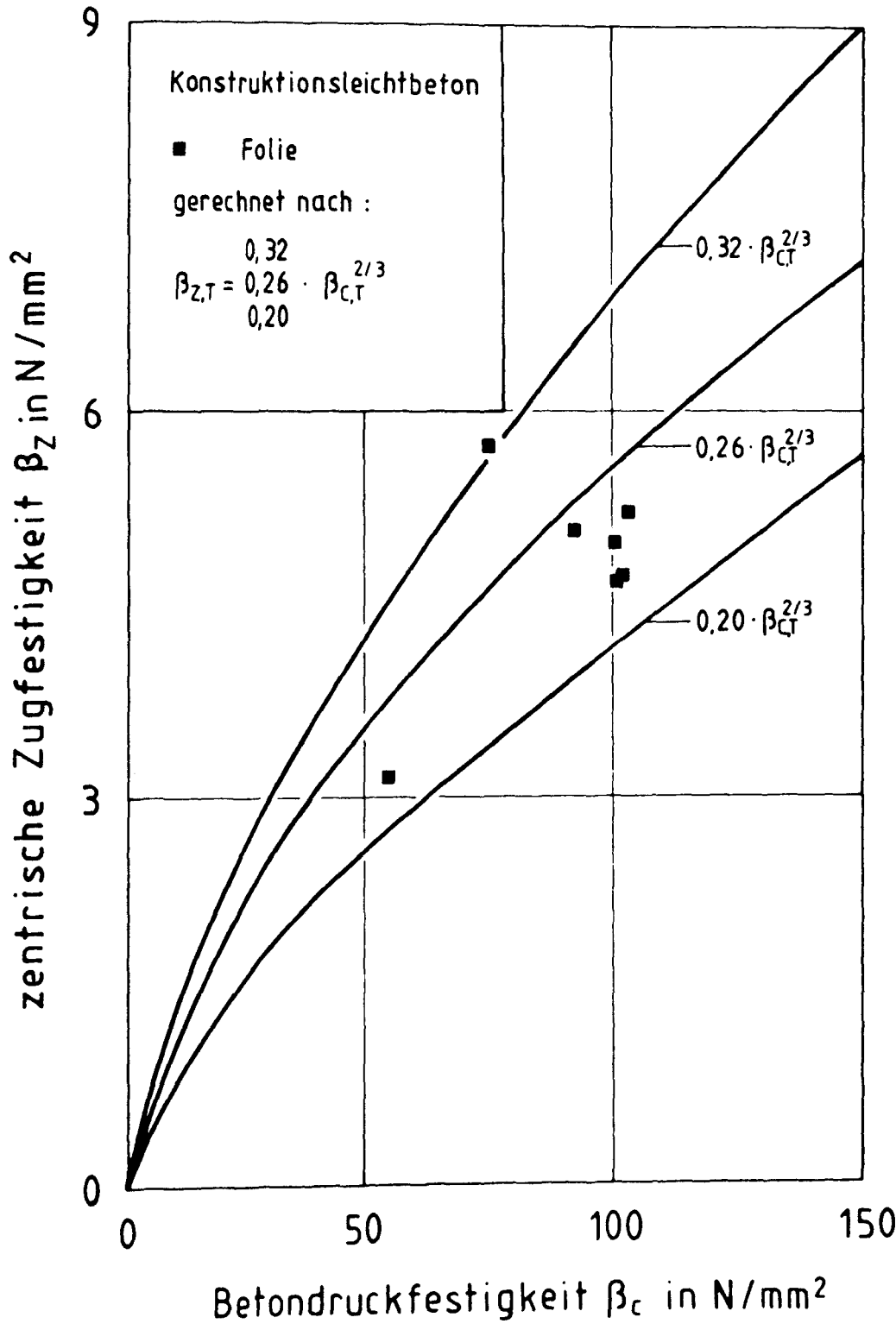


Bild 7.14 Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der zentrischen Zugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen

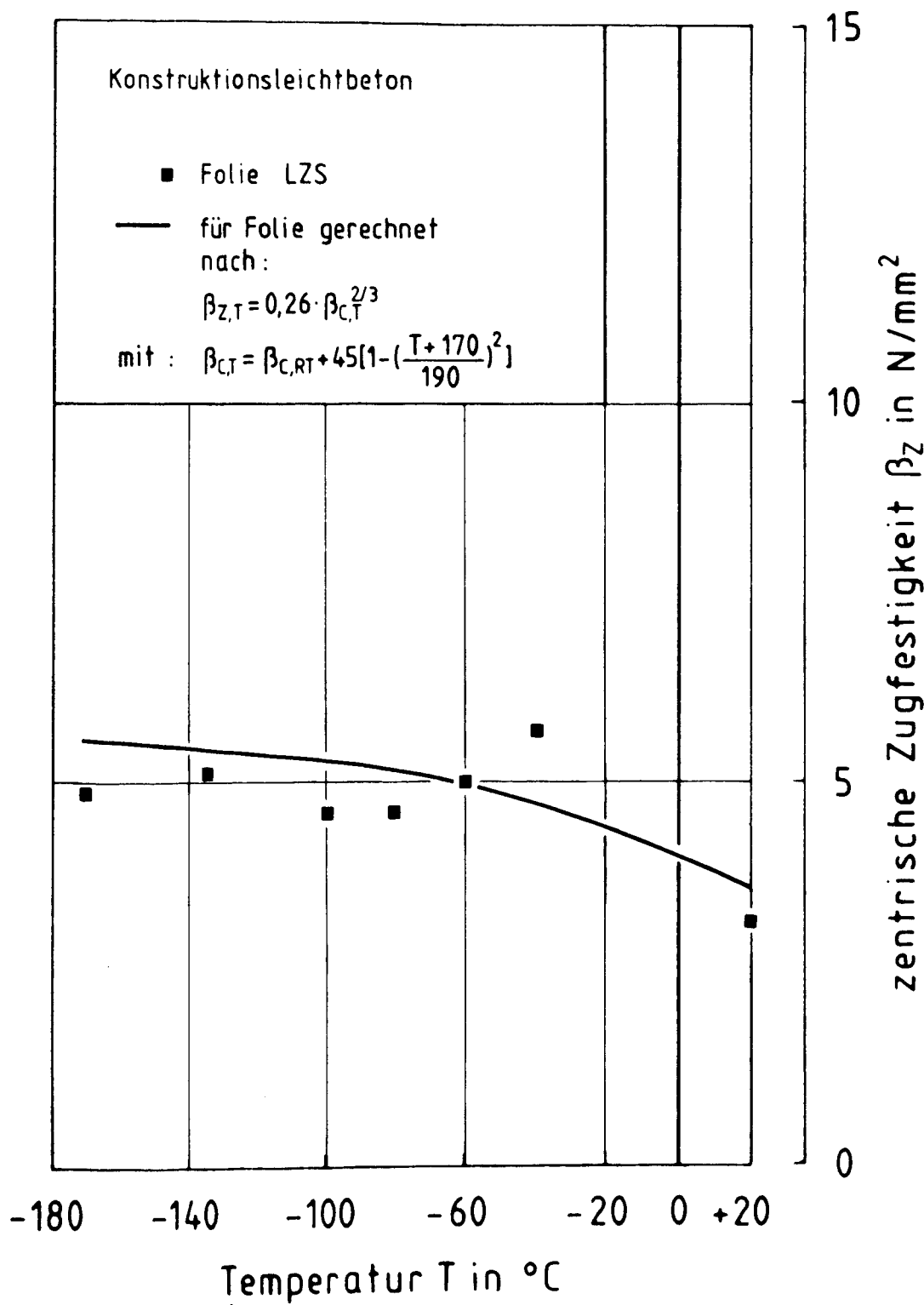


Bild 7.15

Zentrische Zugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.4 Beschreibung der Festigkeit und der Verformung von zugbeanspruchtem Beton durch einen additiven Rechenansatz

7.4.1 Spaltzugfestigkeit

Normalbeton

Zur Beschreibung der Spaltzugfestigkeit im Tieftemperaturbereich wird ein additiver Ansatz gewählt. Der rechnerische Zuwachs ist dabei eine Funktion der mittleren Feuchte und der Temperatur (Gleichung 7.11).

$$\beta_{SZ,T} = \beta_{SZ,RT} + \Delta\beta_{SZ}$$

mit $\Delta\beta_{SZ} = f(u_m) \cdot f(T)$

Bild 7.16 zeigt die Versuchsergebnisse aller im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz durchgeführten Spaltzugversuche an Normalbeton bei tiefen Temperaturen. Dargestellt ist in Anlehnung an Gleichung 7.11 die Zunahme der Spaltzugfestigkeit gegenüber Raumtemperatur in N/mm^2 . Ferner werden die wesentlichen Betonparameter angegeben. Folgende Feststellungen können getroffen werden:

- Beim B25 und beim B45 bewirkt die Steigerung der mittleren Feuchte u_m von 20/65-Lagerung zu Folienlagerung im gesamten Temperaturbereich einen Anstieg der Festigkeitszunahme.
- Beim B45 bewirkt die Steigerung der mittleren Feuchte u_m von Folienlagerung zu Wasserlagerung eine leichte Verringerung der Festigkeitszunahme.
- Beim B25 bewirkt die Steigerung der mittleren Feuchte u_m von Folienlagerung zu Wasserlagerung einen Anstieg der Festigkeitszunahme.
- Der wassergelagerte B25 mit einer mittleren Feuchte u_m von 9,0 % zeigt eine geringere Festigkeitssteigerung als der foliengelagerte B45 mit einer mittleren Feuchte von 5,5 %.
- Bis auf den 20/65 gelagerten B25 mit einer mittleren Feuchte u_m von 2,9 % zeigen alle Kurven einen ähnlichen Kurvenverlauf.

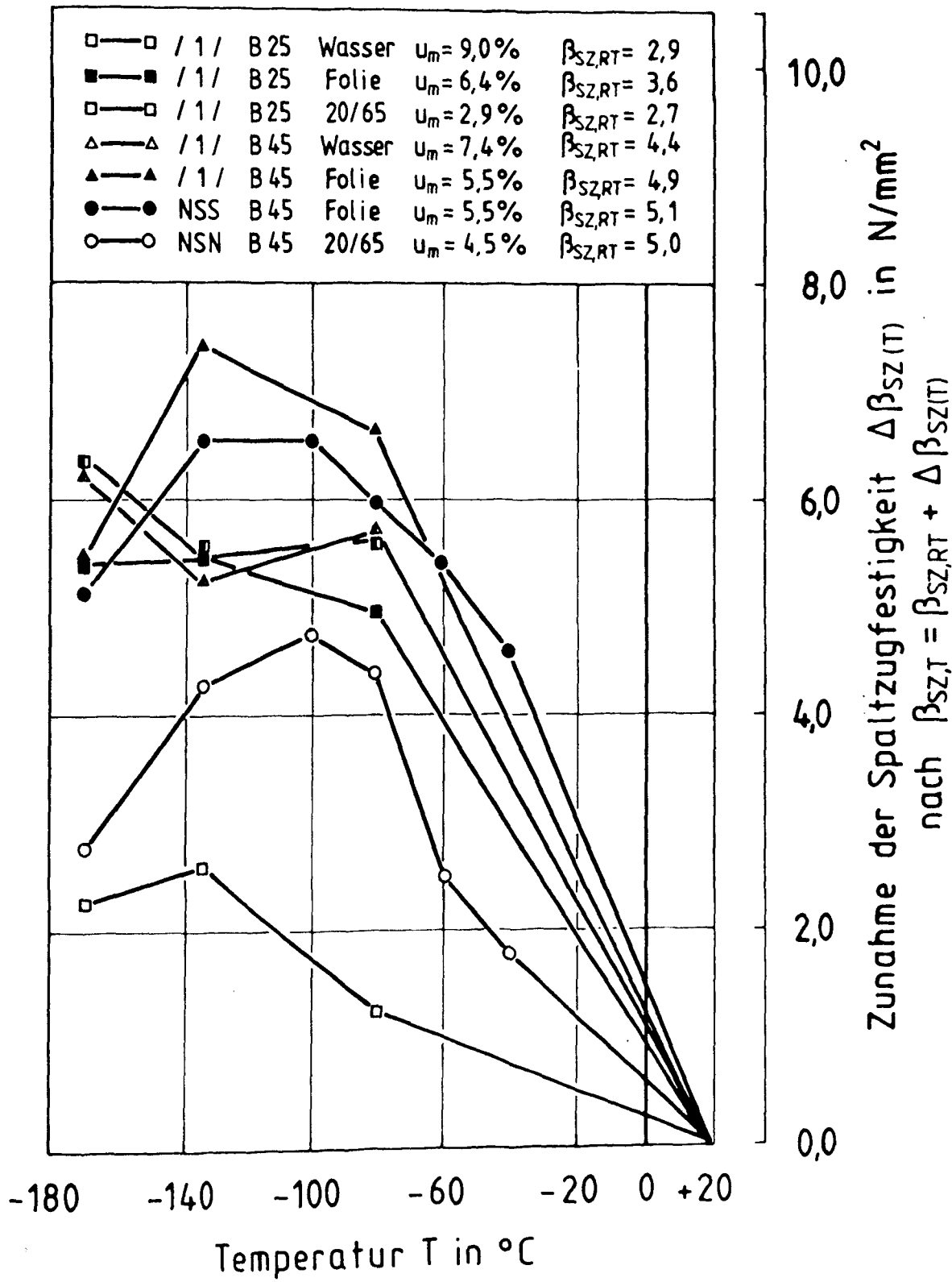


Bild 7.16

Zunahme der Spaltzugfestigkeit von Normalbeton
bei tiefen Temperaturen

Es zeigt sich, daß der Parameter "mittlere Feuchte" nicht ausreicht, die Zunahme der Spaltzugfestigkeit für verschiedene Betone einheitlich zu beschreiben. Die Entwicklung der Spaltzugfestigkeit im Tieftemperaturbereich ist nicht nur von der absoluten Menge des im Beton gespeicherten Wassers abhängig, sondern auch von der Porosität und der Porenstruktur und damit von dem w/z-Wert des Betons. Neben der mittleren Feuchte müßte also auch der Wassersättigungsgrad und die Porenradialverteilung bekannt sein.

Um dennoch zu einem handlichen Rechenansatz zu gelangen, wird der Einfluß der mittleren Feuchte für den B25 und den B45 getrennt dargestellt. Ferner werden für beide Betone obere rechnerische Grenzwerte für die mittlere Feuchte angegeben, ab denen keine weitere Steigerung der Festigkeitszunahme zu erwarten ist.

Damit ergibt sich für einen B25 mit einem w/z-Wert von 0,8 der folgende Rechenansatz (Gleichung 7.12)

$$\beta_{SZ,T} = \beta_{SZ,RT} + (u_m - 0,9) \left[1 - \left(\frac{T+170}{190} \right)^3 \right]$$

mit $\min u_m = 0,9 \%$ und $\max u_m = 7,0 \%$

Bild 7.17 zeigt die Versuchsergebnisse für den B25 und die gerechneten Werte nach Gleichung 7.12. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung ist gut.

Für den B45 wurde der folgende Rechenansatz entwickelt (Gleichung 7.13)

$$\beta_{SZ,T} = \beta_{SZ,RT} + (2,5 \cdot u_m - 7,25) \left[1 - \left(\frac{T+170}{190} \right)^3 \right]$$

mit $\min u_m = 3,0 \%$ und $\max u_m = 5,5 \%$

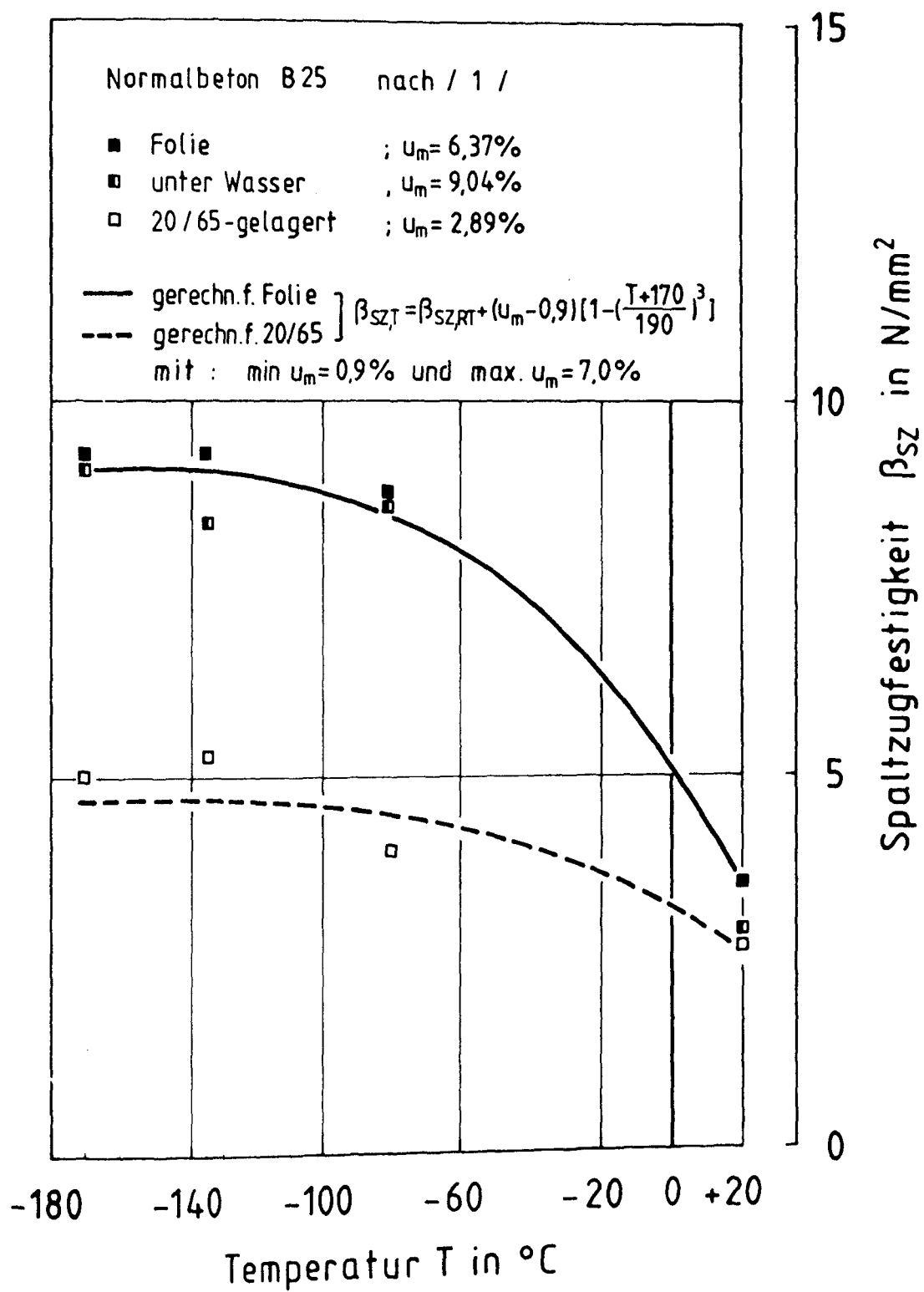


Bild 7.17

Spaltzugfestigkeit von Normalbeton B25 bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

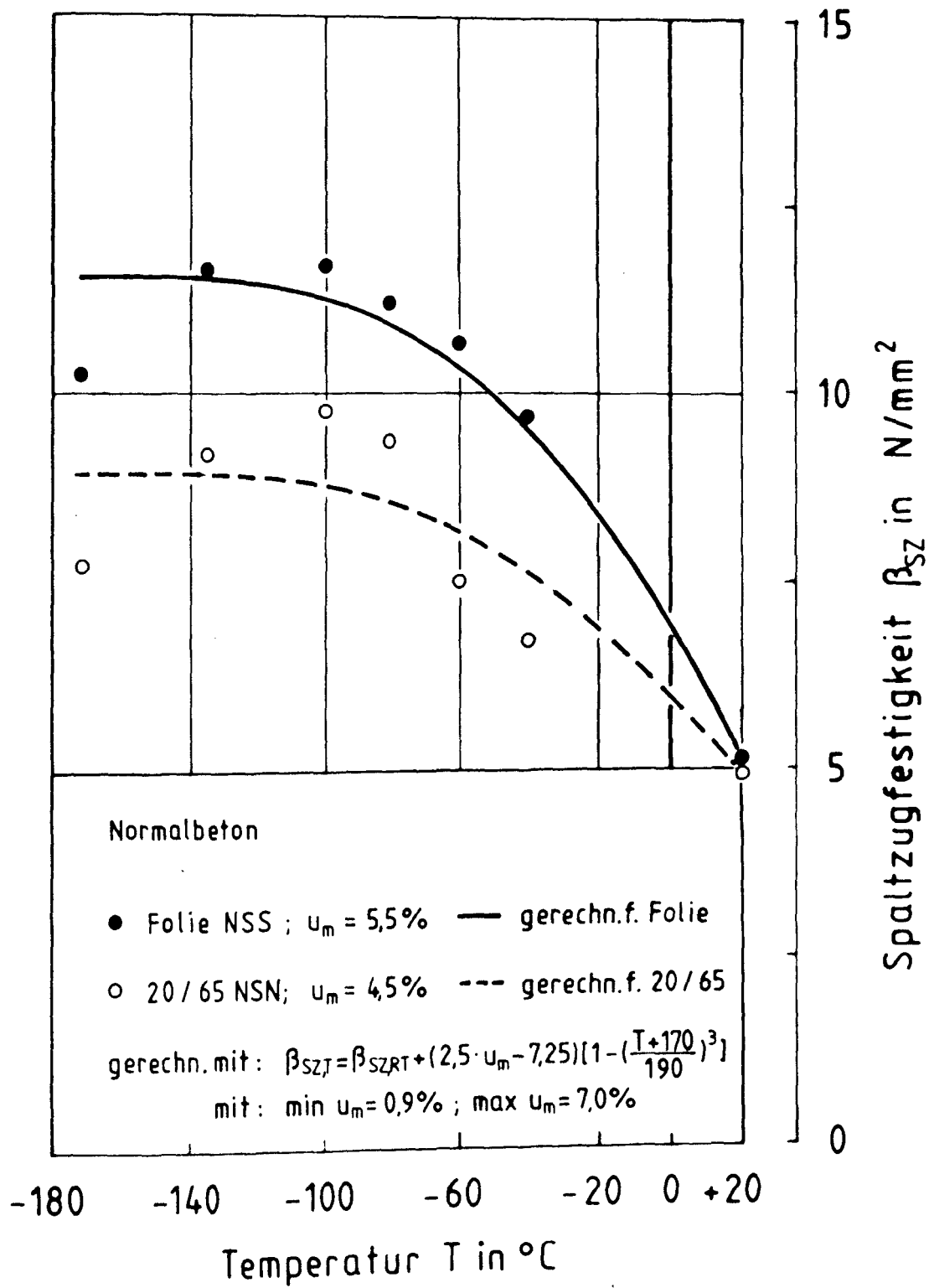


Bild 7.18

Spaltzugfestigkeit von Normalbeton B45 bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

Bild 7.18 zeigt die Versuchsergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens und die nach Gleichung 7.13 ermittelten rechnerischen Werte. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung ist auch hier gut, insbesondere bei Vergleich mit dem in Bild 7.9 dargestellten Rechenansatz über den Faktor nach CEB-FIP Model Code.

Leichtbeton

Auch für die Beschreibung der Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen wird ein Rechenansatz nach Gleichung 7.11 gewählt.

Bild 7.19 zeigt die Ergebnisse aller bisher am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz durchgeführten Spaltzugversuche an Leichtbeton bei tiefen Temperaturen. Aufgetragen ist die absolute Zunahme der Spaltzugfestigkeit in N/mm^2 . Bei der Beurteilung der Kurvenverläufe ist der vertikale Maßstab zu beachten: die vorliegenden Versuchsergebnisse weisen eine mittlere Streubreite von $\pm 0,75 \text{ N/mm}^2$ gegenüber dem Mittelwert auf.

Im Gegensatz zum Normalbeton in Bild 7.16 ist beim Leichtbeton keine eindeutige Abhängigkeit der Zunahme der Spaltzugfestigkeit von der mittleren Feuchte zu erkennen. Diese Feststellung gilt auch für die Entwicklung der Druckfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen, was zu einem feuchteunabhängigen Rechenansatz für die Druckfestigkeit führte (siehe Gleichung 7.2). Für die Entwicklung der Spaltzugfestigkeit wird daher folgender Rechenansatz vorgeschlagen (Gleichung 7.14).

$$\beta_{\text{SZ},T} = \beta_{\text{SZ},RT} + 1,5 \left[1 - \left(\frac{T+170}{190} \right)^5 \right]$$

Bild 7.20 zeigt die Versuchsergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens und die nach Gleichung 7.14 ermittelten rechnerischen Werte. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist für die foliengelagerten Versuchskörper gut. Die Festigkeitsentwicklung der normalklimagelagerten Versuchskörper ist mit dem Rechenansatz nicht beschreibbar. Allerdings zeigt Bild 7.19 die Sonderstellung dieser Versuchsreihe innerhalb der bisher durchgeführten Versuche.

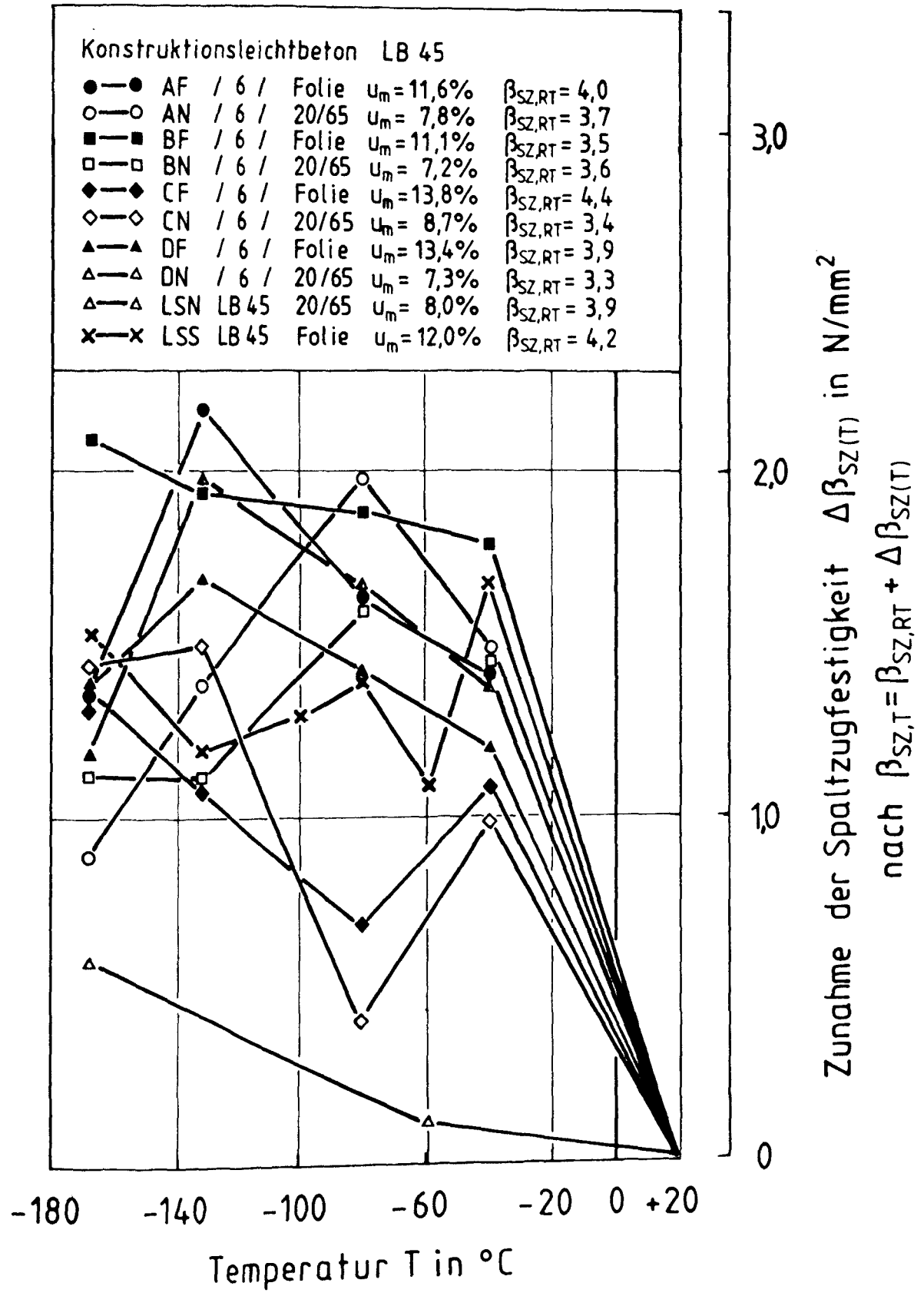


Bild 7.19

Zunahme der Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen

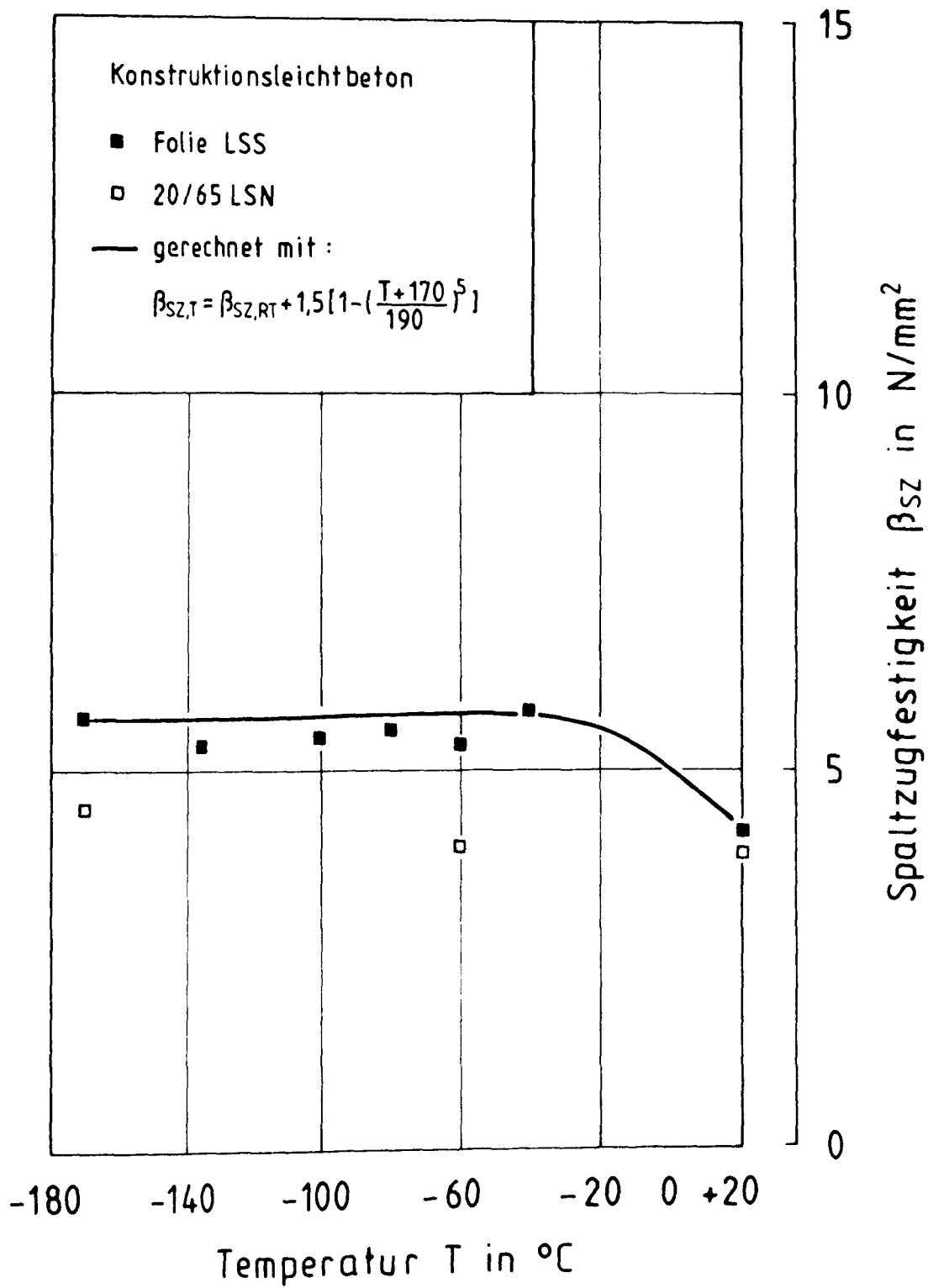


Bild 7.20

Spaltzugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.4.2 Zentrische Zugfestigkeit

Normalbeton

Auch für die zentrische Zugfestigkeit wird ein additiver Rechenansatz nach Gleichung 7.15 gewählt.

$$\beta_{Z,T} = \beta_{Z,RT} + \Delta\beta_Z$$

Aufgrund der geringen Anzahl der Versuchsergebnisse für zentrischen Zug ist ein direkter Ansatz z.Z. nur in Anlehnung an die Spaltzugfestigkeit möglich. In Abschnitt 6.4.1 wurden die gemessenen Zugfestigkeitswerte erläutert und mögliche Ursachen für die geringen Werte der zentrischen Zugfestigkeit bei Raumtemperatur gegeben. Bild 6.19 hat gezeigt, daß die Entwicklung der zentrischen Zugfestigkeit annähernd parallel zu der Spaltzugfestigkeit verläuft. Es wird daher empfohlen, für den Ansatz der zentrischen Zugfestigkeit nach Gleichung 7.15 folgenden Zusammenhang zu formulieren (Gleichung 7.16).

$$\Delta\beta_Z = a \cdot \Delta\beta_{SZ}$$

Bild 7.21 zeigt den Zusammenhang zwischen den absoluten Werten der zentrischen und der Spaltzugfestigkeit. Es wird deutlich, daß der Zusammenhang in guter Näherung linear erfolgen kann. Ausgehend von den Raumtemperaturwerten ergibt sich der Faktor a der Geradengleichung zu $a = 0,7$. Damit folgt für den Ansatz der zentrischen Zugfestigkeit von Normalbeton mit Gleichung 7.13 die Gleichung 7.17 für einen B45.

$$\beta_{Z,T} = \beta_{Z,RT} + 0,7(2,5 u_m - 7,25) \left[1 - \left(\frac{T+170}{190} \right)^3 \right]$$

mit $\min u_m = 3,0 \%$ und $\max u_m = 5,5 \%$

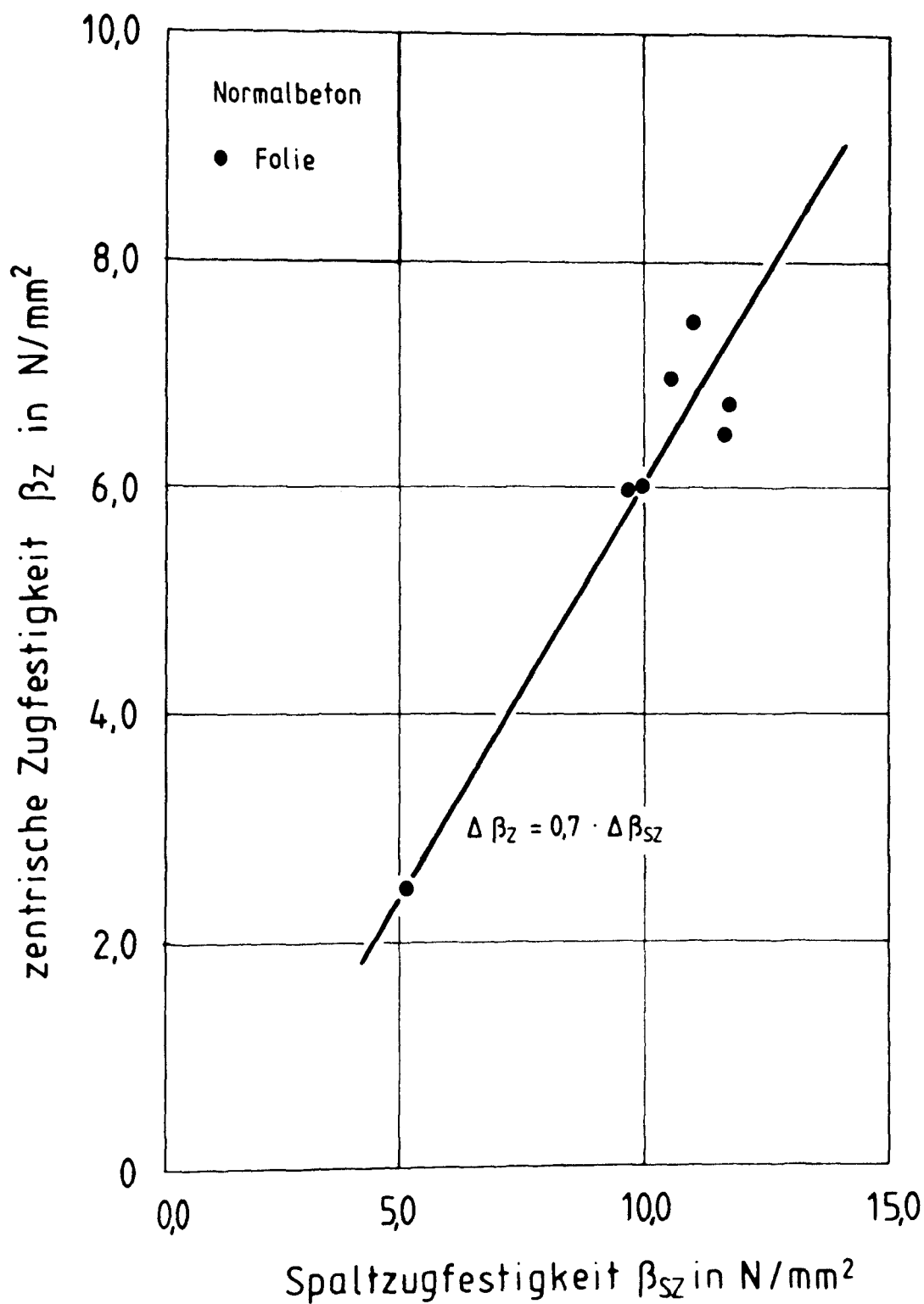


Bild 7.21

Zusammenhang zwischen der Spaltzugfestigkeit und der zentrischen Zugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen

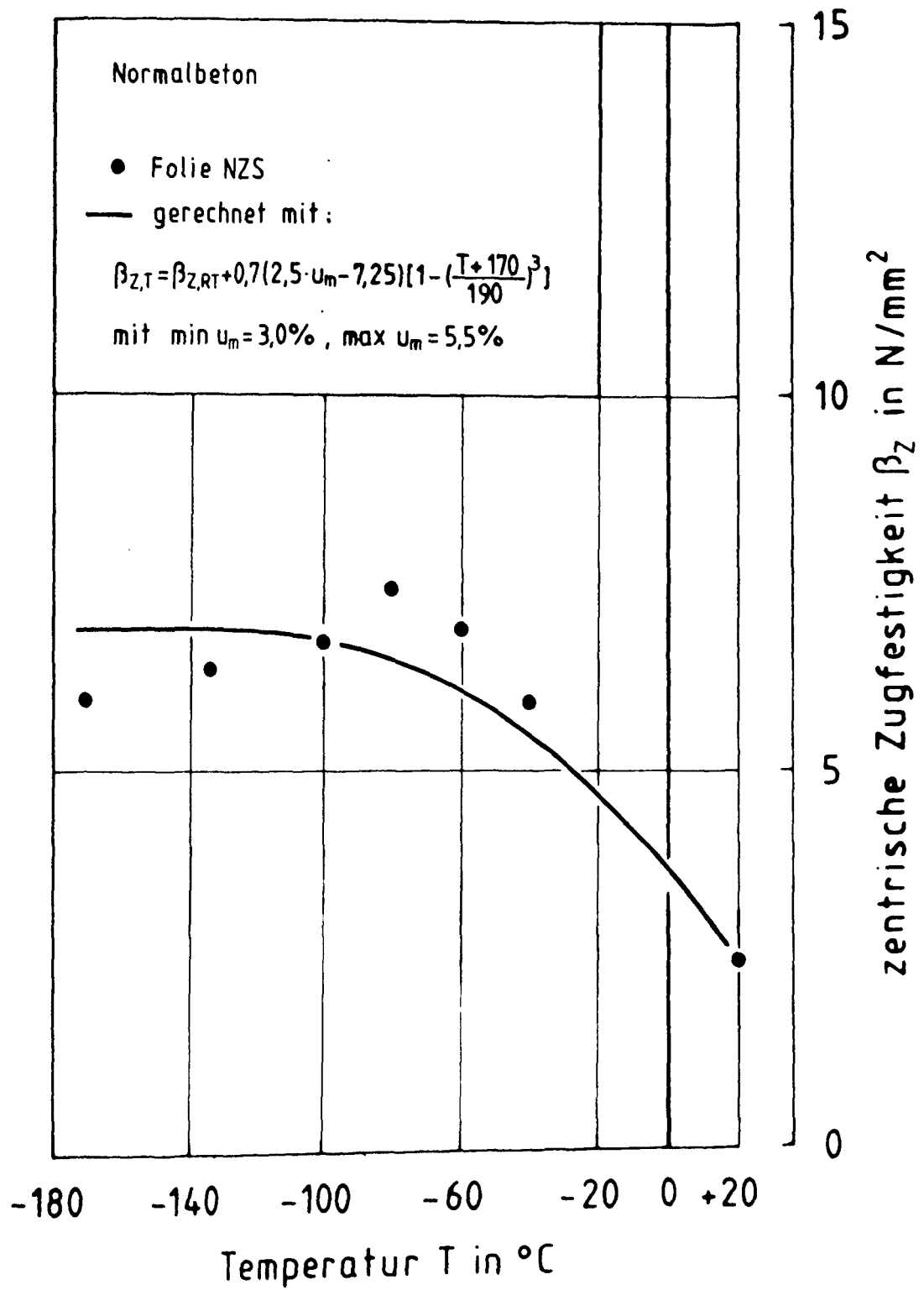


Bild 7.22

Zentrische Zugfestigkeit von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

Bild 7.22 zeigt die Versuchsergebnisse und die nach Gleichung 7.17 ermittelten rechnerischen Werte der zentrischen Zugfestigkeit. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist im Vergleich zu Bild 7.13 gut.

Leichtbeton

Für die Entwicklung der zentrischen Zugfestigkeit von Leichtbeton wird ähnlich wie beim Normalbeton verfahren. Wie Bild 7.23 zeigt, beträgt der Faktor a der Geradengleichung beim Leichtbeton $a = 1,5$. Damit folgt nach Gleichung 7.14 für die zentrische Zugfestigkeit Gleichung 7.18.

$$\beta_{Z,T} = \beta_{Z,RT} + 2,25 \left[1 - \left(\frac{T+170}{190} \right)^5 \right]$$

Bild 7.24 zeigt die Versuchsergebnisse und die nach Gleichung 7.18 ermittelten rechnerischen Werte. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung ist gut.

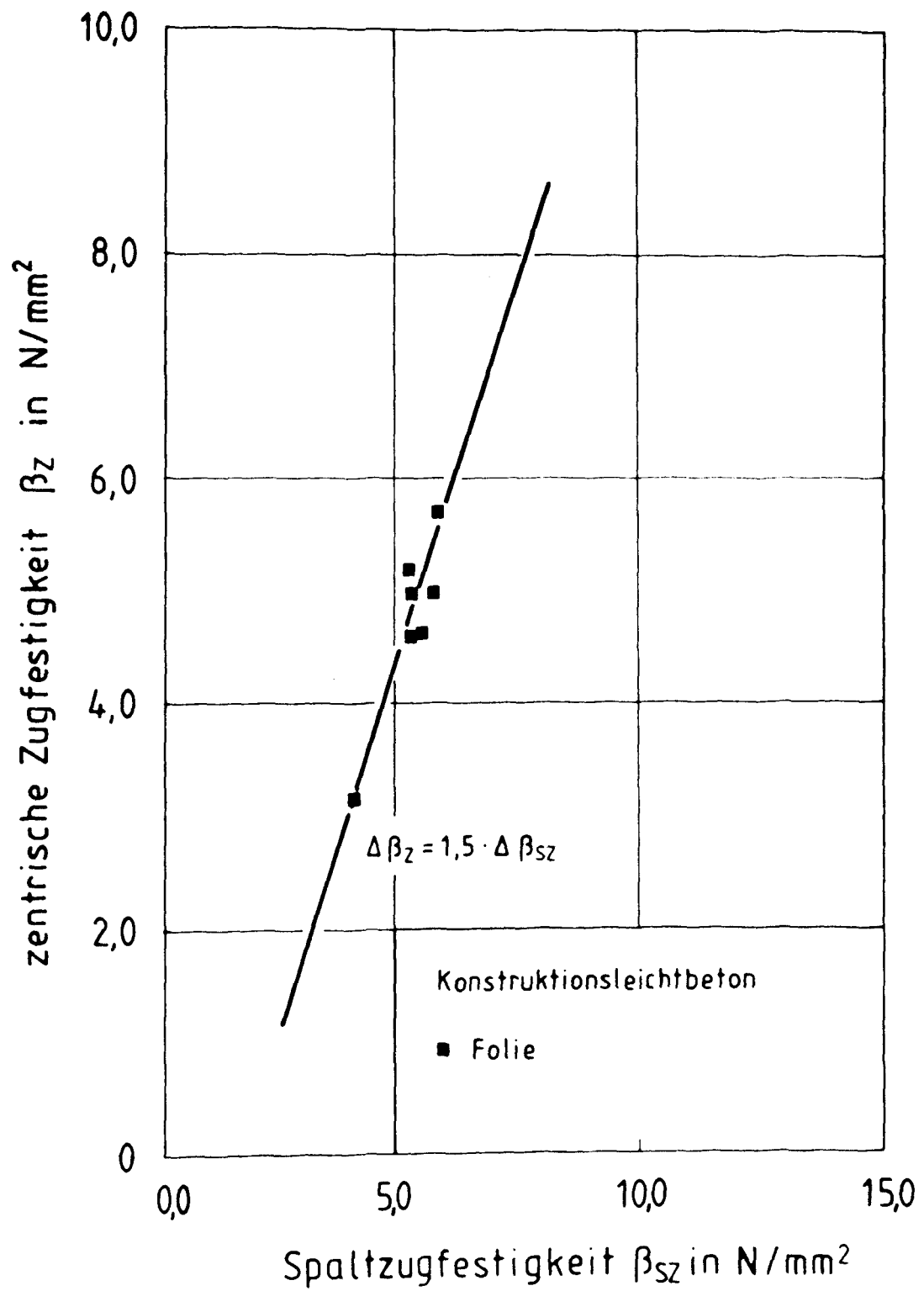


Bild 7.23

Zusammenhang zwischen der Spaltzugfestigkeit und der zentrischen Zugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen

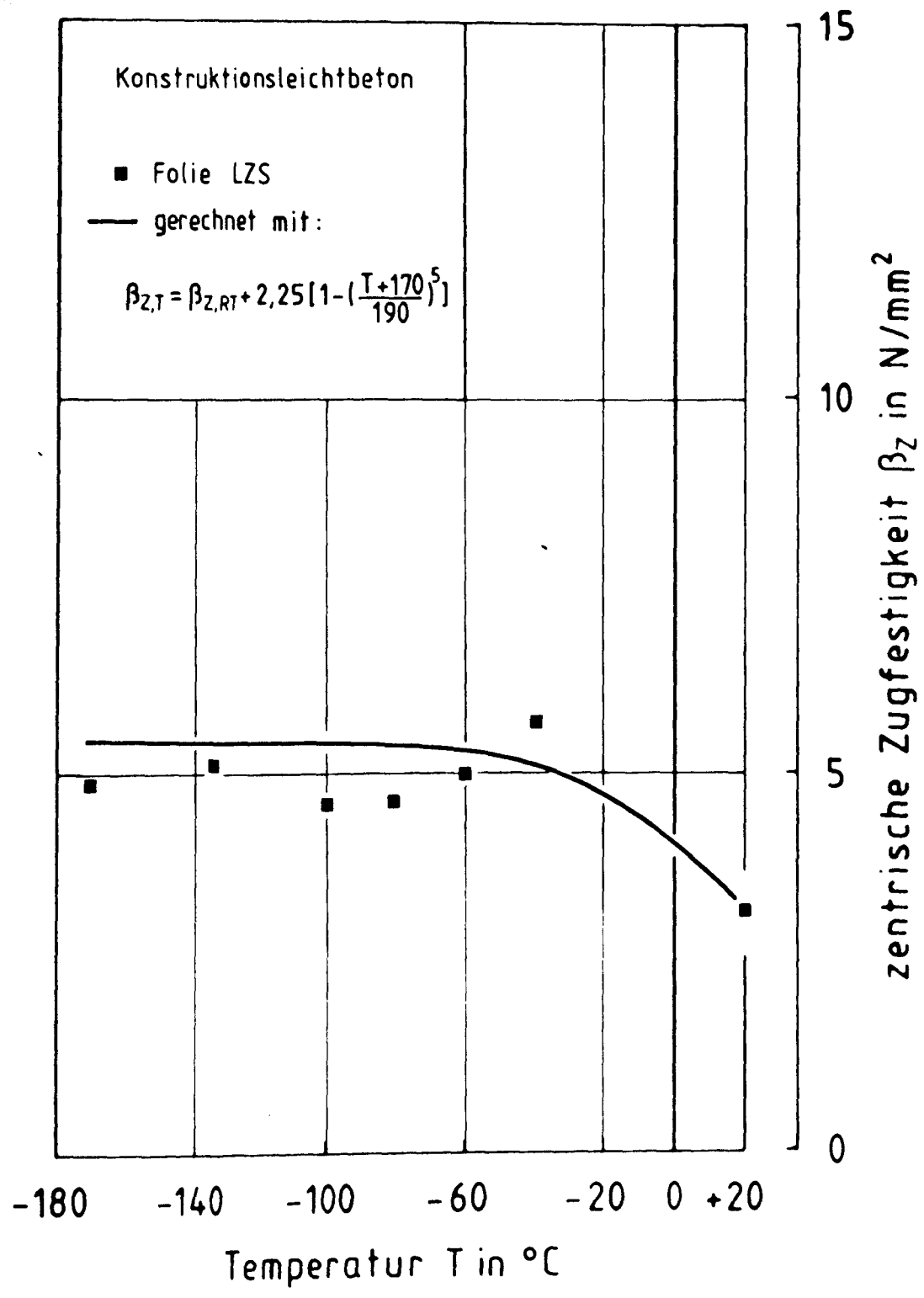


Bild 7.24 Zentrische Zugfestigkeit von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.4.3 Zugbruchdehnung

Normalbeton

Für die Beschreibung der Zugbruchdehnung aus zentrischen Zugversuchen liegen bisher zu wenige Versuche vor, um einen gesicherten direkten Ansatz zu ermitteln. Es wird daher ein Rechenansatz auf der Basis der Druckbruchdehnung empfohlen. Die gemessenen Zugbruchdehnungen betragen im Mittel ein Fünfzehntel der Druckbruchdehnungen. Das Verformungsmaximum ist von -80°C im Druckversuch auf -60°C im Zugversuch verschoben. Werden diese Änderungen in die Gleichung 7.3 eingesetzt, erhält man für die Zugbruchdehnung unter Berücksichtigung des geänderten Vorzeichens Gleichung 7.19.

$$-60^{\circ}\text{C} \leq T \leq +20^{\circ}\text{C} \quad \epsilon_{Z,T} = \epsilon_{Z,RT} + \left[1 - \left(\frac{T+60}{80}\right)^2\right] \cdot \frac{u_m}{75}$$

$$-170^{\circ}\text{C} \leq T \leq -60^{\circ}\text{C} \quad \epsilon_{Z,T} = \epsilon_{Z,RT} + \frac{T+170}{110} \cdot \frac{u_m}{75}$$

Bild 7.25 zeigt die Versuchsergebnisse und die nach Gleichung 7.19 ermittelten rechnerischen Werte. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist befriedigend.

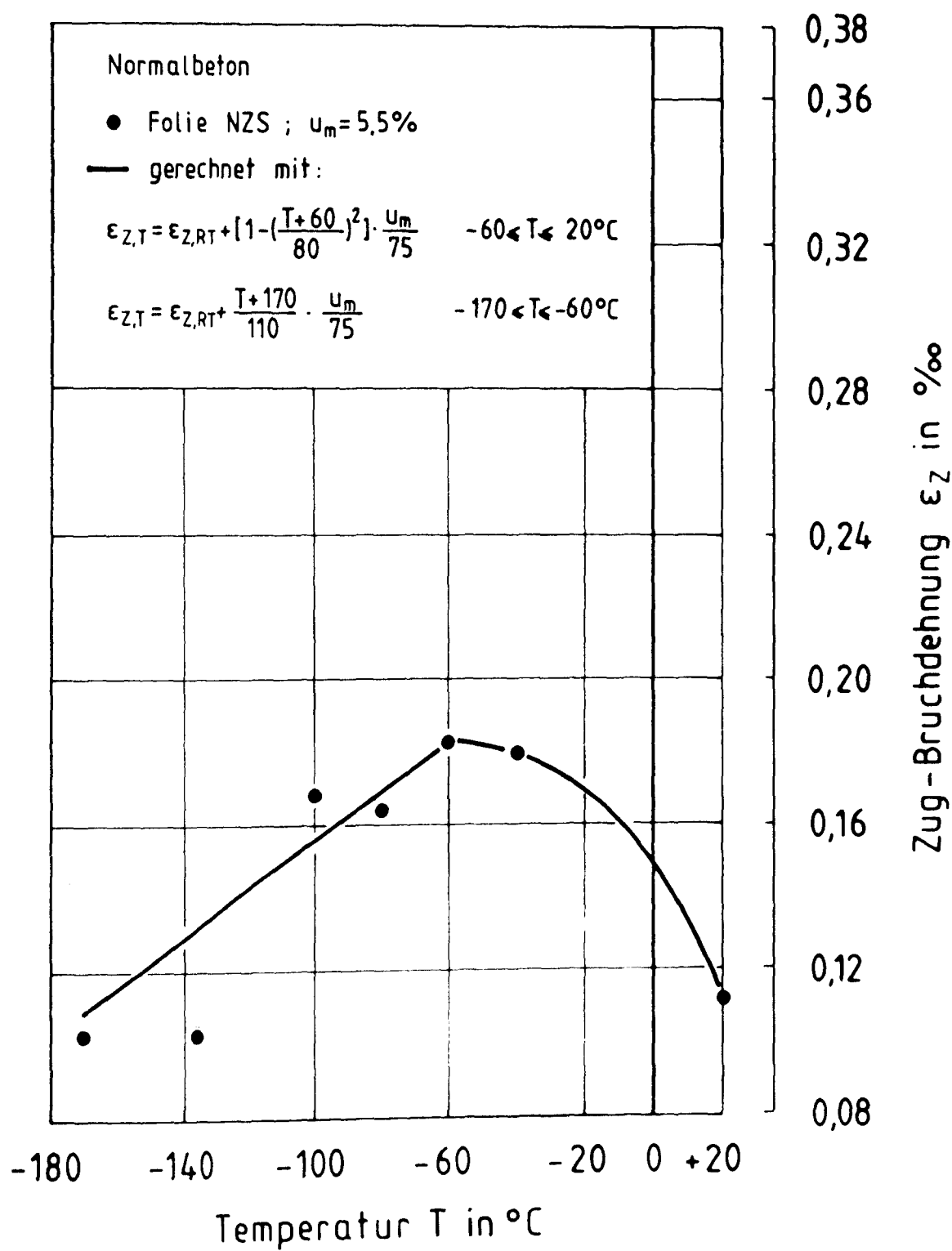


Bild 7.25 Zugbruchdehnung von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

Leichtbeton

Auch beim Leichtbeton kann für die Beschreibung der Zugbruchdehnung der Rechenansatz für die Druckbruchdehnung benutzt werden. Hier betragen die gemessenen Zugbruchdehnungen im Mittel ein Zehntel der Druckbruchdehnungen, der Maximalwert ist von -60°C auf -40°C verschoben. Es ergibt sich Gleichung 7.20 für den Rechenansatz der Zugbruchdehnung von Leichtbeton.

$$\begin{aligned} -40^{\circ}\text{C} \leq T \leq +20^{\circ}\text{C} \quad \epsilon_{Z,T} &= \epsilon_{Z,RT} + 0,15 \left[1 - \left(\frac{T+40}{60} \right) \right] \\ -170^{\circ}\text{C} \leq T \leq -40^{\circ}\text{C} \quad \epsilon_{Z,T} &= \epsilon_{Z,RT} - \left\{ 0,02 - 0,17 \left(\frac{T+170}{130} \right)^2 \right\} \end{aligned}$$

Bild 7.26 zeigt die Versuchsergebnisse und die nach Gleichung 7.20 ermittelten rechnerischen Werte. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist gut.

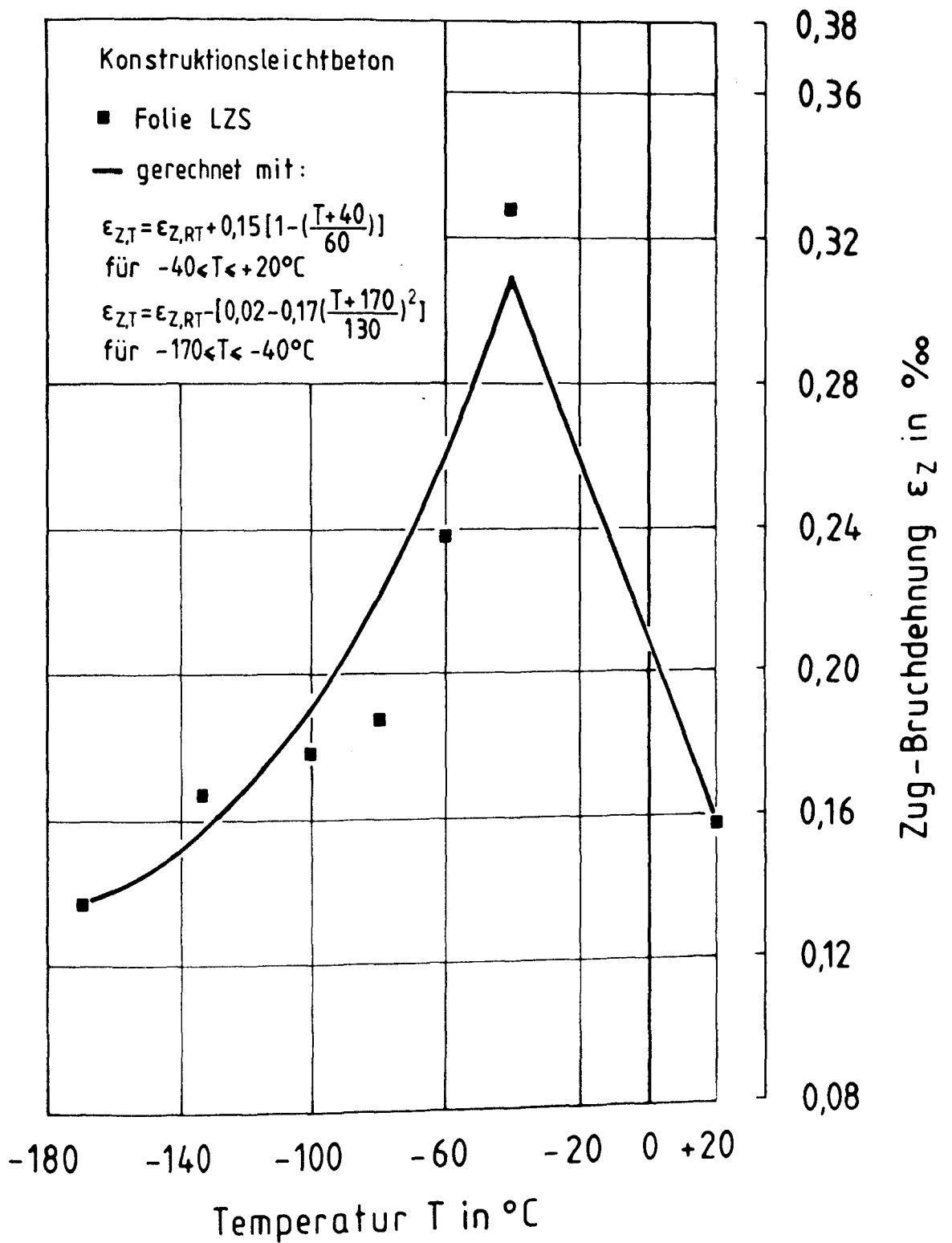


Bild 7.26

Zugbruchdehnung von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

7.4.4 Zug-E-Modul

Normalbeton

Zur Beschreibung des Zug-E-Moduls für Normalbeton wird der Rechenansatz aus Gleichung 7.5 abgeleitet. Der Zug-E-Modul des Normalbetons ist bei Raumtemperatur ca. 20 % größer als der Druck-E-Modul. Die temperaturbedingte Zunahme des Zug-E-Moduls ist ebenfalls größer als beim Druck-E-Modul. Damit ergibt sich für die Beschreibung des Zug-E-Moduls bei Normalbeton Gleichung 7.21.

$$E_{Z,T} = E_{Z,RT} + 5 u_m \frac{20-T}{190}$$

Bild 7.27 zeigt die Versuchsergebnisse und die nach Gleichung 7.21 ermittelten rechnerischen Werte. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist in Anbetracht der großen Streuung der Versuchsergebnisse gut.

Leichtbeton

Beim Leichtbeton entspricht der Zug-E-Modul bei Raum- und bei Tieftemperatur dem Druck-E-Modul. Der Rechenansatz nach Gleichung 7.6 kann daher für den Zug-E-Modul übernommen werden (Gleichung 7.22).

$$E_{Z,T} = E_{Z,RT} + 13,3 \left[1 - \sqrt{\frac{T+170}{190}} \right]$$

Bild zeigt die Versuchsergebnisse und die ermittelten rechnerischen Werte nach Gleichung 7.22. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch ist gut.

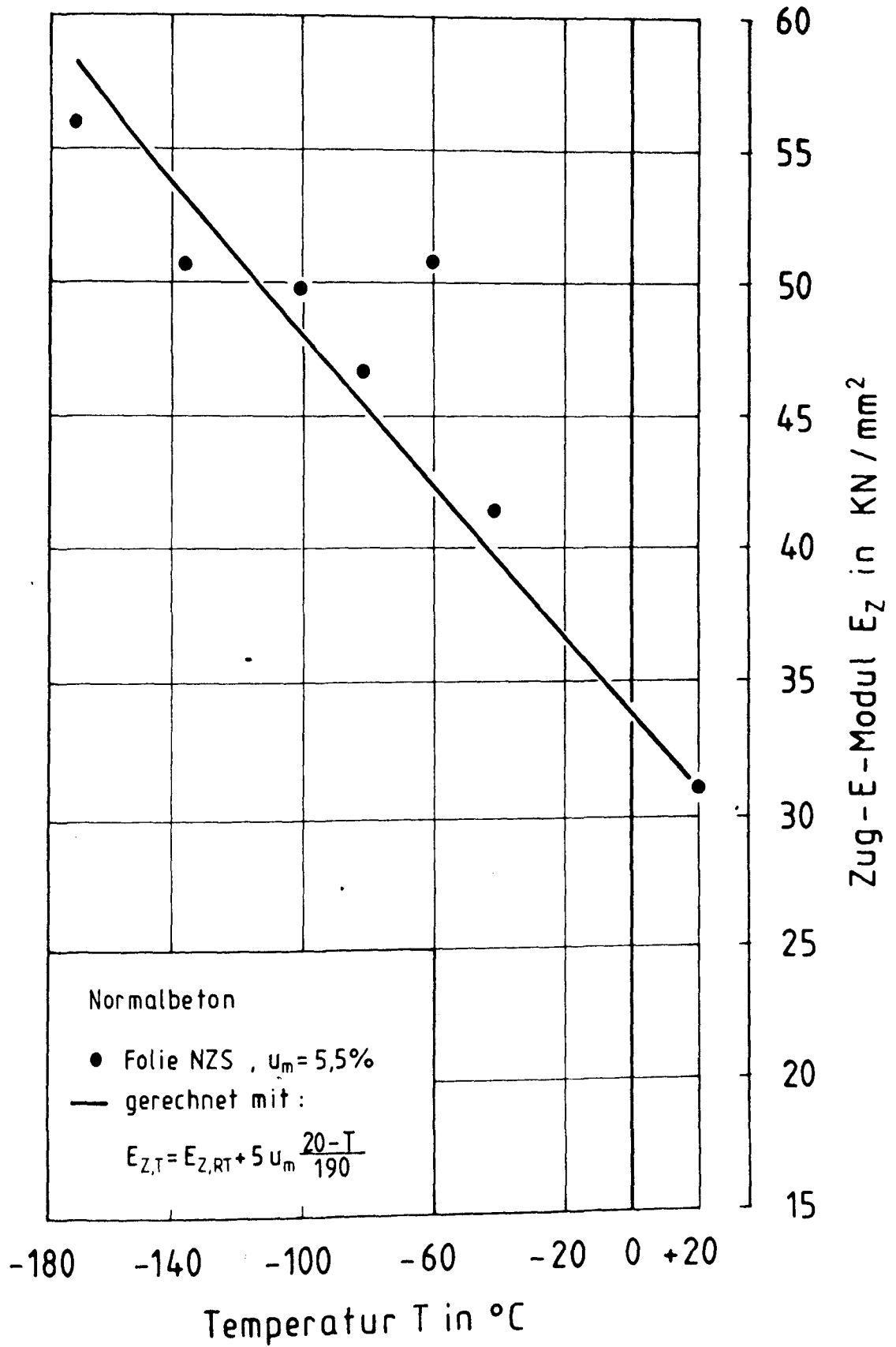


Bild 7.27

Zug-E-Modul von Normalbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

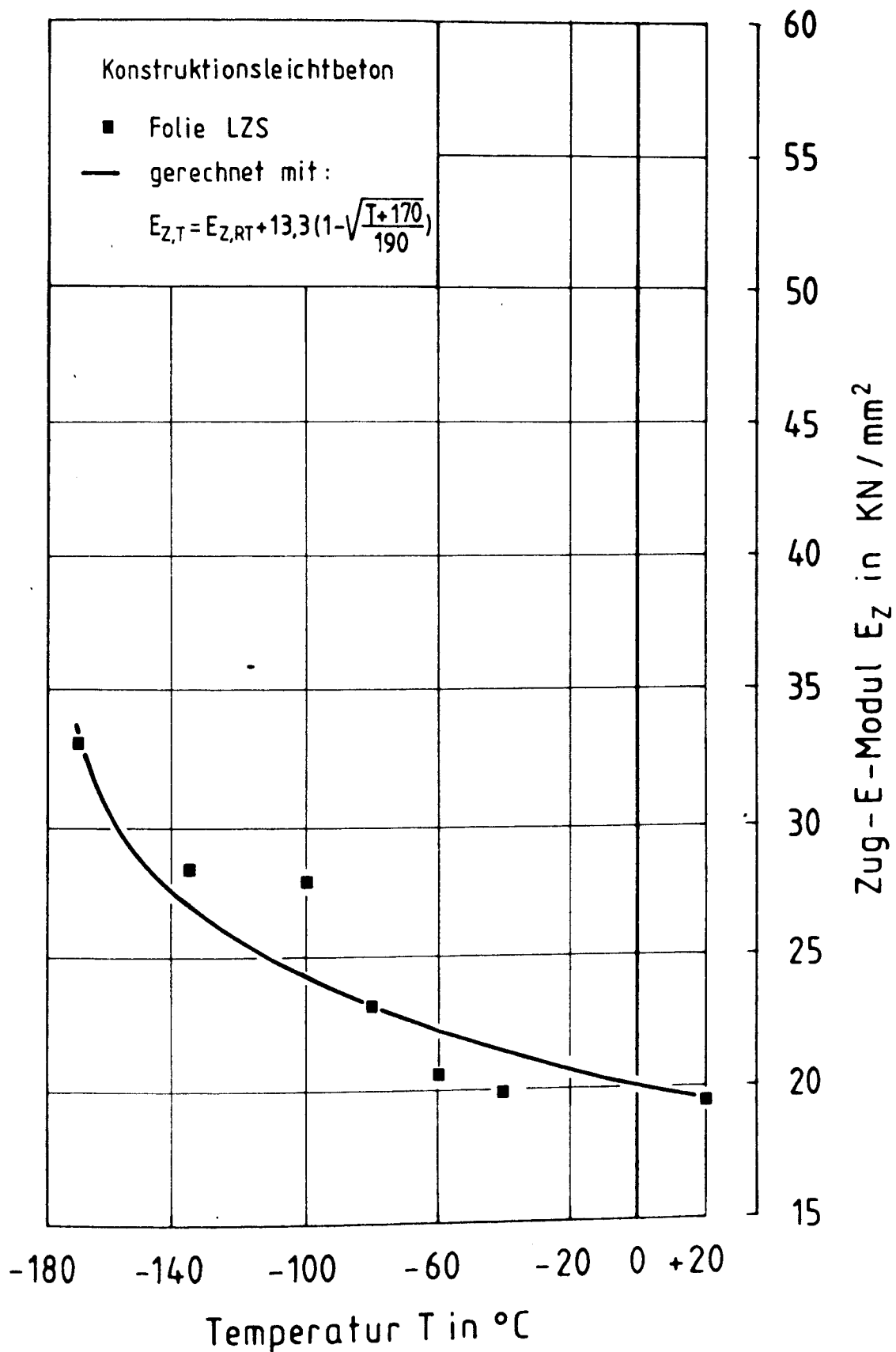


Bild 7.28

Zug-E-Modul von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen; Vergleich der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsergebnis

8 ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Forschungsbericht gibt im ersten Teil einen Überblick über die Schwierigkeiten, die mit der Krafteinleitung in zentrische Zugkörper aus Leichtbeton höheren Feuchtegehaltes bei Tieftemperatur verbunden sind. Die gewählte Form der Lasteinleitung wird beschrieben und begründet.

Im Abschnitt 6 werden alle Versuchsergebnisse vorgestellt und bewertet.

Der Abschnitt 7 gibt eine Zusammenfassung aller in früheren Forschungsarbeiten der Autoren entwickelten Rechenansätze und ihre Anwendung auf die hier vorliegenden Versuchsergebnisse. Für die Festigkeit und die Verformung von zugbeanspruchtem Beton werden anhand der in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Versuchsergebnisse additive Rechenansätze in Anlehnung an die schon bestehenden entwickelt.

Erstmals werden für die Spaltzug- und die zentrische Zugfestigkeit direkte, von der Druckfestigkeit unabhängige Rechenansätze angegeben. Dadurch ist es möglich, mit einer einzigen Gleichung, in der nur die Parameter mittlere Feuchte u_m und Temperatur T verändert werden, das gesamte Festigkeits- und Verformungsverhalten auf Zug und Druck für Normalbeton und Konstruktionsleichtbeton anzugeben. Die hieraus folgenden Rechenwerte werden in den Anlagen 1 und 2 angegeben.

9 LITERATUR

- /1/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.;
Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen; Teil 1 und 2;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Dez. 1984
- /2/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.;
Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen; Teil 3 und 4;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, April 1985
- /3/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.;
Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen; Teil 5;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, August 1986
- /4/ Rostásy, F.S.; Pusch, U.;
Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen; Teil 6;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, März 1987
- /5/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.; Pusch, U.;
Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen; Teil 7;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, April 1987
- /6/ Rostásy, F.S.; Pusch, U.;
Thermische Dehnung und Restfestigkeit von Konstruktionsleichtbeton bei bzw. nach zyklischer Tieftemperaturbeanspruchung;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, November 1984

- /7/ Rostásy, F.S.; Pusch, U.;
Strength and deformation of lightweight concrete of variable moisture content at very low temperatures;
The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 9, Number 1, February 1987
- /8/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.;
Eigenspannungszustand in Stahl- und Spannbetonkörpern infolge unterschiedlichen thermischen Dehnverhaltens von Beton und Stahl bei tiefen Temperaturen;
DAfStb, Heft 380, 1987
- /9/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.;
Verbundverhalten einbetonierten Betonrippenstahls bei extrem tiefer Temperatur;
DAfStb, Heft 380, 1987
- /10/ Wiedemann, G.; Scheuermann, J.; Kordina, K.; Rostásy, F.S.;
Versuche zur Biegetragfähigkeit von Stahlbetonplattenstreifen bei extrem tiefer Temperatur;
DAfStb, Heft 380, 1987
- /11/ Rostásy, F.S.;
Verfestigung und Versprödung von Beton durch tiefe Temperaturen;
Sonderdruck aus der Festschrift Gallus Rehm zum 60. Geburtstag, Verlag Ernst und Sohn, 1984
- /12/ Rostásy, F.S.;
Assessment of mechanical properties of concrete, reinforcing steel, prestressing steel and prestressing systems for cryogenic applications;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, September 1986
- /13/ Rostásy, F.S.; Scheuermann, J.;
Verbund und innerer Zwang von einbetoniertem Bewehrungsstahl bei tiefer Temperatur;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Juni 1984

- /14/ Scheuermann, J.;
Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Verbund und Ribbildung von
Stahlbetonbauteilen;
Dissertation, TU Braunschweig, 1987
- /15/ Wiedemann, G.;
Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton;
Dissertation, TU Braunschweig, 1982
- /16/ Erdmann, J.; Landwehrs, K.; Neisecke, J.; Rostásy, F.S.;
Tieftemperatur-Prüftechnologien für Bewehrungs- und Spannstähle sowie
Beton im Temperaturbereich +20°C bis -180°C;
Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1/83, und 2/83
- /17/ CEB/FIP - Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und Spannbeton;
Band II, 1978
- /18/ Rüsç, H.;
Die Ableitung der charakteristischen Werte der Betonzugfestigkeit;
Beton 2/75, Seite 55-58
- /19/ Heilmann, H.G.;
Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons;
Beton-Herstellung und Verwendung 19 (1969), Seite 68-70
- /20/ Bamforth, P.B.; Murray, W.T.; Browne, R.D.;
The application of concrete property data at cryogenic temperature to LNG
tank design;
Second International Conference on Cryogenic Concrete, Amsterdam, October
1983
- /21/ Iványi, G.;
Zugfestigkeit von Beton in örtlich veränderlichen Beanspruchungszuständen
- Gradientenwirkung;
Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU
Braunschweig, 1976

- /22/ Eibl, J.; Iványi, G.;
Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton;
DAfStb, Heft 260, 1976
- /23/ Grübel, P.;
Über die Zugfestigkeit von Leichtbeton;
Beton- und Stahlbetonbau 2/1980
- /24/ Goto, Y.; Miura, T.;
Experimental studies on properties of concrete cooled to about minus
160°C;
Technology Reports, Tohoku University, Vol.44, No.2, July 1979
- /25/ Okada, T.; Iguro, M.;
Bending behaviour of prestressed concrete beams under low temperature;
Journal of Japanese Prestressed Concrete Engineering Association, Vol.20,
Special Issue for 8th FIP Congress 1978
- /26/ Schnell, J.R.;
Zur Bemessung von bewehrten Betonbauteilen für kombinierte Beanspruchungen
aus Last, Vorspannung und Temperaturzwang unter Berücksichtigung
temperaturabhängiger Materialgesetze bei Normal- und Tieftemperatur;
Mitteilungen aus dem Institut für Massivbau der Technischen Hochschule
Darmstadt, Heft 37

Anlage 1

Rechenwerte zum Festigkeits- und Verformungsverhalten
von Normalbeton bei tiefen Temperaturen

$$Y_{,T} = Y_{,RT} + A \cdot B$$

mit $A = f(u_m)$ $B = f(T)$

(Zwischenwerte linear interpolieren)

	Y	Empfohlen für:	A	B für T =								
				-20°C	-40°C	-60°C	-80°C	-100°C	-120°C	-140°C	-170°C	Glg.
Druck	β_D	B25 w/z=0,8 B45 w/z=0,6	$12 \cdot u_m$	0,38	0,53	0,66	0,78	0,86	0,93	0,98	1,00	7.1
	ϵ_D	B25 w/z=0,8 B45 w/z=0,6	$0,2 \cdot u_m$	-0,64	-0,84	-0,96	-1,00	-0,78	-0,56	-0,33	0,0	7.3
	E_D	B25 w/z=0,8 B45 w/z=0,6	$4 \cdot u_m$	0,21	0,32	0,42	0,53	0,63	0,74	0,84	1,00	7.5
Zug	β_{SZ}	B25 w/z=0,8	$u_m - 0,9 \cdot$	0,51	0,68	0,81	0,89	0,95	0,98	0,99	1,00	7.12
		B45 w/z=0,6	$2,5 u_m - 7,25^*$	0,51	0,68	0,81	0,89	0,95	0,98	0,99	1,00	7.13
	β_Z	B45 w/z=0,6	$1,75 u_m - 5,0^*$	0,51	0,68	0,81	0,89	0,95	0,98	0,99	1,00	7.17
	ϵ_Z	B45 w/z=0,6	$u_m/75$	0,75	0,94	1,00	0,82	0,64	0,45	0,27	0,0	7.19
	E_Z	B45 w/z=0,6	$5 u_m$	0,21	0,32	0,42	0,53	0,63	0,74	0,84	1,00	7.21

* min $u_m = 3,0 \%$ max $u_m = 5,5 \%$

• min $u_m = 0,9 \%$ max $u_m = 7,0 \%$

Einheiten: $\beta_D, \beta_S, \beta_Z$ in N/mm^2 , E_D, E_Z in kN/mm^2 , ϵ_D in %, ϵ_Z in ‰ u_m in Gew.-%

Anlage 2

Rechenwerte zum Festigkeits- und Verformungsverhalten
von Leichtbeton bei tiefen Temperaturen

$$Y_T = Y_{RT} + A \cdot B$$

mit $A = f(u_m)$ $B = f(T)$

(Zwischenwerte linear interpolieren)

	Y	Empfohlen für:	A	B für T =								
Druck				-20°C	-40°C	-60°C	-80°C	-100°C	-120°C	-140°C	-170°C	Glg.
	β_D	LB 45	45,00	0,38	0,53	0,66	0,78	0,86	0,93	0,98	1,00	7.2
	ϵ_D	LB 45	1,50	-0,50	-0,75	-1,00	-	-	-	-	-	7.3
			1,00	-	-	-1,50	-0,94	-0,49	-0,15	0,07	0,20	
	E_D	LB 45	13,30	0,11	0,17	0,24	0,31	0,39	0,49	0,60	1,00	7.6
Zug	β_{SZ}	LB 45	1,50	0,69	0,85	0,93	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	7.14
	β_Z	LB 45	2,25	0,69	0,85	0,93	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	7.18
	ϵ_Z	LB 45	0,15	0,67	1,00	-	-	-	-	-	-	7.20
			1,00	-	0,15	0,10	0,06	0,03	0,01	-0,01	-0,02	
	E_Z	LB 45	13,30	0,11	0,17	0,24	0,31	0,39	0,49	0,60	1,00	7.22

Einheiten: $\beta_D, \beta_S, \beta_Z$ in N/mm^2 , E_D, E_Z in kN/mm^2 , ϵ_D in %, ϵ_Z in ‰ u_m in Gew.-%

FACHGEBIETE UND ABTEILUNGEN

